

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLOGICAS
Departamento de Geodinámica



**CARACTERIZACION TERMO-HIDRO-MECANICA DE
UNA BENTONITA DE CABO DE GATA**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR
Maria Victoria Villar Galicia

Bajo la dirección de los doctores:
Luís Ignacio González del Vallejo y Antonio Lloret Morancho

Madrid, 2001

ISBN: 84-669-1790-X



Universidad Complutense de Madrid
Facultad de Ciencias Geológicas
Departamento de Geodinámica

CARACTERIZACIÓN TERMO-HIDRO- MECÁNICA DE UNA BENTONITA DE CABO DE GATA

María Victoria Villar Galicia

2000



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE



5314015292

TESIS DOCTORAL

i25815337

CARACTERIZACIÓN TERMO-HIDRO- MECÁNICA DE UNA BENTONITA DE CABO DE GATA

María Victoria Villar Galicia

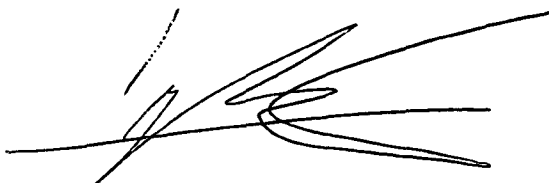
Memoria presentada en el Departamento de Geodinámica de
la Universidad Complutense de Madrid para optar al grado
de Doctor en Ciencias Geológicas.

Madrid, septiembre de 2000



Dr. Antonio Lloret Moranco

Director de la Tesis



Dr. Luis Ignacio González de Vallejo

Tutor en el Departamento



AGRADECIMIENTOS

La presente Tesis Doctoral no se habría podido llevar a cabo sin la colaboración de varias personas y organismos. En estas líneas quiero destacar su contribución y agradecerla sinceramente.

La dirección del estudio ha corrido a cargo del Dr. Antonio Lloret, del Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Universidad Politécnica de Cataluña, que con una gran dedicación y paciencia ha sido el soporte científico fundamental de este trabajo.

Los ensayos se han llevado a cabo en las instalaciones del Proyecto de Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos (antes División de Técnicas Geológicas) de CIEMAT, concretamente en los laboratorios de Mecánica de Suelos y Materiales Subsaturados. Pedro Rivas, como Jefe del Proyecto, ha respaldado la realización de la Tesis con su constante apoyo y su aportación de ideas.

Ramón Campos ha conseguido, con su amplia experiencia, voluntad y dedicación, que gran número de ensayos llegaran a su fin satisfactoriamente, siendo su colaboración fundamental en el diseño y tarado de equipos y resolución de averías. Por otra parte, el trabajo de laboratorio ha sido realizado en su mayor parte por personal técnico de CIEMAT: Alicia Pelayo, Juan Aroz, Joaquín Almendrote y Juan Manuel Durán, a quienes agradezco su aplicación.

Pedro Luis Martín, con el que he colaborado desde que ambos iniciamos nuestra actividad en el CIEMAT, ha estado siempre dispuesto a discutir conceptos y resultados.

Pascual Fariña, como asesor del Proyecto FEBEX, ha estado presente en esta Tesis desde su inicio, siendo uno de sus impulsores. Sus correcciones de varios informes para dicho Proyecto han condicionado la redacción y el contenido de este trabajo, que también ha revisado.

La mayor parte de los equipos de laboratorio utilizados han sido fabricados por Mecánica Científica S.A. (Getafe) o en los Talleres Generales de CIEMAT. La colaboración en el diseño de equipos del personal de ambos, especialmente de Manuel Cáceres, ha sido activa y valiosa.

Joaquín Farias ha suministrado algunas de las figuras, y Miguel Angel Jiménez ha realizado la adaptación de otras muchas.

El estudio al microscopio electrónico ha sido realizado en el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Politécnica de Cataluña, asistido por Montserrat Marsal y el Dr. José María Manero.

El Dr. Luis Ignacio González de Vallejo ha sido mi tutor en el Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid, en el que se presenta esta Tesis, facilitándome en toda ocasión los trámites oficiales.

Finalmente, es obligado señalar que este estudio se ha realizado en el contexto del Proyecto FEBEX, financiado por ENRESA y la Unión Europea y dirigido por Fernando Huertas.

ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS UTILIZADOS	V
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	4
ESTRUCTURA DE LA TESIS	5
ANTECEDENTES	7
EL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE RESIDUOS RADIACTIVOS.....	7
LAS BENTONITAS COMO MATERIAL DE RELLENO Y SELLADO	9
ACTIVIDADES INTERNACIONALES EN EL CAMPO DEL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO: BARRERA DE ARCILLA	12
EL ESTUDIO DE LAS BARRERAS DE ARCILLA EN ESPAÑA.....	23
<i>Prospección y selección inicial (1987-1989)</i>	25
<i>Selección del yacimiento Cortijo de Archidona (Almería) (1989-1991).....</i>	27
<i>Estudios de comportamiento THM de la bentonita S-2 (1991-1995).....</i>	30
<i>El Proyecto FEBEX.....</i>	35
COMPORTAMIENTO TERMO-HIDRO-MECÁNICO DE ARCILLAS EXPANSIVAS	41
CARACTERÍSTICAS DE LAS ESMECTITAS	42
<i>Descripción</i>	42
<i>Propiedades hidro-mecánicas.....</i>	47
LA BENTONITA EN LAS CONDICIONES DEL ALMACENAMIENTO	54
TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA EL ESTUDIO DE MATERIALES EXPANSIVOS Y SUBSATURADOS	59
<i>Suelos expansivos.....</i>	59
Cuantificación de la expansión	62
Medida de la permeabilidad.....	64
<i>Suelos no saturados.....</i>	65
Medida y control de la succión	68
Medida del cambio de volumen	73
Medida de la permeabilidad.....	77
Medida de la resistencia.....	80

MATERIAL.....	85
CONTEXTO GEOLÓGICO	85
ORIGEN.....	88
EXPLOTACIÓN Y PROCESADO	90
MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA	92
AGUA UTILIZADA.....	97
METODOLOGÍA	99
CONTROL DE CALIDAD.....	99
CARACTERIZACIÓN BÁSICA.....	100
<i>Peso específico</i>	100
<i>Densidad y humedad gravimétrica</i>	101
<i>Límites de Atterberg</i>	102
<i>Granulometría</i>	104
ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA.....	105
<i>Porosimetría</i>	106
<i>Superficie específica externa</i>	113
<i>Microscopía electrónica de barrido</i>	116
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	118
PERMEABILIDAD AL GAS	122
ENSAYOS EN EDÓMETRO	127
<i>Presión de hinchamiento</i>	128
<i>Hinchamiento bajo carga</i>	131
ENSAYOS CON SUCCIÓN CONTROLADA	132
<i>Determinación de la relación succión/humedad a volumen libre</i>	135
Ensayo en celdas de membrana	136
Ensayo en desecadores.....	139
<i>Curva de retención a volumen constante</i>	140
Curva de retención en edómetro con succión controlada.....	141
Curva de retención en celdas indeformables.....	143
<i>Ensayos edométricos con succión controlada</i>	146
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	156
RESULTADOS.....	161
CARACTERIZACIÓN BÁSICA.....	161

<i>Peso específico</i>	161
<i>Límites de Atterberg, superficie específica y granulometría</i>	162
<i>Porosidad</i>	170
DENSIDAD DEL AGUA	176
CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA	182
<i>Conductividad hidráulica</i>	182
Variación en función de la densidad seca	183
Variación en función del tipo de agua	189
Variación en función del sentido de la medida	192
Influencia de la carga hidráulica aplicada	196
<i>Permeabilidad al gas</i>	199
<i>Curva de retención</i>	211
Curva de retención a volumen libre	211
Curva de retención a volumen constante	237
Conclusiones	258
CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	260
<i>Presión de hinchamiento</i>	260
Variación en función del índice de poros	260
Variación en función del tipo de agua	264
Variación en función del sentido de la medida	266
<i>Hinchamiento bajo carga</i>	270
<i>Ensayos edométricos con succión controlada</i>	279
Edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno	281
Edómetros con control de succión mediante disoluciones	293
Edómetros con control de succión y temperatura	320
Análisis de resultados	328
CARACTERIZACIÓN TÉRMICA	355
<i>Conductividad térmica</i>	355
CONCLUSIONES	365
PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES	365
CARACTERIZACIÓN TERMO-HIDRO-MECÁNICA DE UNA ARCILLA EXPANSIVA	368
<i>Permeabilidad</i>	370
<i>Retención de agua</i>	371
<i>Hinchamiento</i>	374
<i>Conductividad térmica</i>	374

<i>Anisotropía</i>	375
<i>Deformabilidad en condiciones no saturadas</i>	375
LA BENTONITA COMO BARRERA DE INGENIERÍA	378
INVESTIGACIONES POSTERIORES	380
BIBLIOGRAFÍA	383

ANEXO I: PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

ANEXO II: PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE HINCHAMIENTO EN EDÓMETRO

ANEXO III: PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL HINCHAMIENTO BAJO CARGA

ANEXO IV: PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS

ANEXO V: PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA

ANEXO VI: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS POROSIMÉTRICOS EN MUESTRAS DE BLOQUES

ANEXO VII: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EDMÉTRICOS CON SUCCIÓN CONTROLADA

ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS UTILIZADOS

AECL	Atomic Energy of Canada Limited
AGP	Almacenamiento Geológico Profundo
AITEMIN	Asociación para la Investigación y Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales (Madrid)
ANDRA	Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radiactives (Francia)
ASTM	American Society of Testing Materials
BMT	Buffer Mass Test (Stripa, Suecia)
Arcilla de Boom	Formación arcillosa de referencia como roca hospedante en el concepto belga de almacenamiento, constituida por caolinita/illita, cuarzo e interestratificados
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CEDEX	Centro de Experimentación de Obras Públicas, Madrid
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Madrid)
CSIC-Zaidín	Consejo Superior de Investigaciones Científicas – estación Experimental del Zaidín (Granada)
DOE	Department of Energy (Estados Unidos de América)
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Madrid)
EUR	Publicación de la Comisión Europea
FEBEX	Full Scale Engineered Barrier Experiment in Crystalline Host Rock
FoCa	Esmectita francesa de Fourges-Cahaignes, utilizada como material de referencia en el concepto de almacenamiento de ANDRA
G.3S	Groupement pour l'Etude des Structures Souterraines de Stockage (Francia)
GRS	Gesellschaft für Anlagen-und-Reaktorsicherheit mbH (<i>Compañía alemana para la seguridad de reactores y sistemas</i>)
HR	Humedad relativa
IDT	Investigación y Desarrollo Tecnológico
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
LVDT	Low Voltage Displacement Transducer

MEB	Microscopía electrónica de barrido
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle (<i>Agencia suiza para el almacenamiento de residuos radiactivos</i>)
OCDE	Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos
ONDRAF/NIRAS	Organisme National pour les Déchets Radioactifs et les matières fissiles enrichies (Bélgica)
JNC	Japan Nuclear Cycle Development Institute (Japón)
RAA	Residuos radiactivos de Alta Actividad
UAM	Universidad Autónoma de Madrid
UE	Unión Europea
ULC	Universidad de la Coruña
UNE	Una Norma Española (Norma técnica nacional española)
UPC	Universidad Politécnica de Cataluña
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
USDA	United States Department of Agronomy

a_s	Superficie específica
C_c	Indice de compresión
C_s	Indice de hinchamiento
e	Indice de poros
I_p	Indice de plasticidad
k	Permeabilidad al agua no saturada
k_g	Permeabilidad al gas
k_{g0}	Permeabilidad al gas del suelo seco
k_{ig}	Permeabilidad intrínseca deducida de las medidas de flujo de gas
k_{iw}	Permeabilidad intrínseca deducida de las medidas con flujo de agua
k_r	Permeabilidad relativa
k_w	Permeabilidad saturada al agua (conductividad hidráulica)
p_{atm}	Presión atmosférica
S_r	Grado de saturación
u_a	Presión de aire en los poros
u_w	Presión de agua en los poros
w	Humedad

w_L	Límite líquido
w_P	Límite plástico
ε	Deformación
γ_s	Peso específico
λ	Conductividad térmica
θ	Contenido volumétrico de agua
ρ_d	Densidad seca
ρ_w	Densidad del agua
σ	Carga vertical
σ'_p	Presión de preconsolidación

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento geológico profundo se considera una solución realista para el almacenamiento definitivo de residuos radiactivos de vida larga y alta actividad (RAA), emisores de calor. La seguridad de este concepto de almacenamiento se basa en la existencia de una serie de barreras superpuestas: las barreras naturales, constituidas por la roca hospedante, y las barreras artificiales, constituidas por la propia matriz sólida del residuo, el contenedor metálico y su relleno, los materiales de sellado colocados alrededor del contenedor y los materiales de relleno de las galerías de la instalación.

Los programas de almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad han de optimizar las garantías de validez de los sistemas diseñados y la seguridad a largo plazo. Para ello se desarrollan y aplican modelos contrastados que simulan los diferentes fenómenos que controlan la liberación y migración de radionucleidos desde el almacenamiento a la biosfera y predicen la tasa de dosis a las personas a largo plazo. Para aplicar estos modelos deben existir datos seguros sobre las características de los diferentes componentes del sistema: la geosfera, es decir, la roca almacén, que es la principal barrera para la migración de los radionucleidos a la biosfera; el residuo, cuyas características físicas y químicas bajo diferentes condiciones y a largo plazo es necesario conocer; la barrera de ingeniería, con los diferentes materiales de relleno y sellado; y los procesos que pueden tener lugar en el ámbito del almacenamiento, modificando las propiedades de las barreras e incidiendo en la migración de los radionucleidos. Entre estos procesos se encuentran: la saturación de las barreras de ingeniería y la disipación de calor a través de ellas, la modificación del ambiente geoquímico, la corrosión del contenedor, la generación de gases, la alteración/disolución del residuo, la liberación de radionucleidos y su difusión y sorción en las barreras, y la incorporación al sistema hidrológico subterráneo. Para el conocimiento fiable de estos procesos es necesario: caracterizar los materiales candidatos para el sellado y relleno, validar los modelos geoquímicos que describen el comportamiento de los radionucleidos en el campo próximo, estudiar la generación de gases y su migración en la barrera, demostrar la efectividad del material de sellado frente a

presiones hidráulicas o de gas, e investigar la reacción del medio geológico frente al aumento de temperatura y a la radiación, entre otros.

Como material geológico circundante se han propuesto rocas cristalinas (granito, basalto), arcillosas y salinas. Los conceptos de almacenamiento incluyen la interposición de un material de sellado entre el contenedor y la roca almacén, que, excepto para la opción de la sal, suele estar constituido mayoritariamente por bentonitas. Las bentonitas son rocas compuestas de minerales arcillosos del grupo de las esmectitas, formados a partir de la desvitrificación y alteración química acompañante de materiales ígneos vítreos. Sus propiedades físicas y químicas –baja permeabilidad, elevado potencial de hinchamiento, capacidad de retención alta, plasticidad y resistencia mecánica– las hacen ideales para este uso. Su aceptable conductividad térmica, necesaria para contribuir a la disipación del calor generado por los residuos; buena compactabilidad, que garantiza la posibilidad de fabricar bloques; y longevidad frente a la elevada temperatura y los gradientes químicos, son características que también se valoran.

El concepto español de almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos (AGP) prevé, para las opciones de almacenamiento en granito y en arcilla, la colocación de bloques de bentonita compactada como material de sellado alrededor de los contenedores. La capa de bentonita tendrá un espesor de 0,75 metros, y la temperatura en ella no superará los 100 °C. Los bloques se fabricarán a partir de un granulado de arcilla con su humedad higroscópica, por lo que inicialmente no estarán saturados. Debido a la baja permeabilidad de la bentonita, la barrera tardará en saturarse un tiempo relativamente largo, y este proceso tendrá lugar bajo un gradiente térmico. Las repercusiones de esta fase transitoria sobre el comportamiento posterior de la barrera de arcilla se están aún estudiando.

Por razones técnicas y de escala temporal, la modelización matemática del comportamiento termo-hidro-mecánico de la arcilla es la principal herramienta para la evaluación del comportamiento a largo plazo de los almacenamientos. Esta modelización ha de estar fundada en un conocimiento profundo de los fenómenos básicos físicos, físico-químicos y mecánicos implicados. Las simulaciones numéricas del comportamiento a largo plazo de un almacenamiento han de estar guiadas por investigaciones experimentales, que además sirven para validar los modelos por comparación de los

cálculos con observaciones de campo o laboratorio (Hueckel & Peano 1996). Los modelos han de ser validados a dos escalas: temporal y espacial. La primera se refiere a la extrapolación de la validez de los modelos más allá de la escala temporal de los ensayos. La segunda está relacionada con la variabilidad espacial y las inhomogeneidades dentro de la barrera de arcilla, y con la representatividad del volumen de arcilla empleado en los ensayos. La cuestión de la escala temporal se aborda mediante el estudio de análogos naturales. El problema de la escala espacial se resuelve mediante la experimentación a tres niveles de escala: comenzando por la escala pequeña, con ensayos de laboratorio en muestras homogéneas; siguiendo por los ensayos a escala intermedia, en los que se usan celdas termo-hidráulicas, cámaras de calibración y grandes celdas triaxiales; y finalizando por los ensayos a gran escala, ensayos *in situ* de segunda generación, entre los que se encuentra el Proyecto FEBEX.

El Proyecto FEBEX, iniciado por ENRESA en 1995, es un ensayo de demostración de la posibilidad técnica de instalación de las barreras de ingeniería de un almacenamiento de residuos de alta actividad en roca cristalina, y de estudio de su comportamiento. El Proyecto consta de un ensayo *in situ* a escala real, en la instalación subterránea de Grimsel (Suiza); de un ensayo en maqueta a gran escala bajo condiciones controladas, en las instalaciones de CIEMAT (Madrid); y de una serie de ensayos de laboratorio que complementan la información de los dos ensayos a gran escala sobre el comportamiento del material de sellado, y soportan los trabajos de modelización que se llevan a cabo simultáneamente (ENRESA 2000).

El trabajo presentado en esta Tesis Doctoral forma parte del conjunto de ensayos de laboratorio del Proyecto FEBEX, y se centra en la caracterización termo-hidro-mecánica del material de sellado. Se ha utilizado la bentonita española de referencia, seleccionada por ENRESA a partir de estudios de idoneidad realizados entre 1987 y 1991 por diversas organizaciones, extraída del yacimiento de Cortijo de Archidona, en la región de Cabo de Gata (Almería). CIEMAT participó activamente en la caracterización de este material y, desde 1991, se centró en el estudio de los aspectos termo-hidro-mecánicos y geoquímicos de su comportamiento. Para el Proyecto FEBEX se ha tratado de reproducir el comportamiento de la bentonita en condiciones similares a aquéllas en las que se encontrará en la barrera del almacenamiento durante el transitorio de saturación. Para ello

se ha trabajado con la bentonita compactada a densidades próximas a las de los bloques de la barrera, se ha sometido el material a diferentes condiciones de saturación, y se ha introducido el factor temperatura en algunos ensayos.

El estudio experimental de materiales muy expansivos altamente compactados presenta serias dificultades y no es una práctica habitual en los laboratorios de geotecnia. Por ello no existen técnicas de laboratorio convencionales para abordar su caracterización hidro-mecánica que, en cualquier caso, se suele realizar sólo en condiciones saturadas. Por otra parte, la información experimental referida a materiales no saturados es limitada, especialmente para el caso de arcillas expansivas de succión elevada, como es el caso de la bentonita. De hecho, la mayor parte de los estudios experimentales en esta área llevados a cabo durante los últimos años han tenido lugar en el contexto del estudio de las barreras de ingeniería en almacenamientos de residuos radiactivos. Por estos motivos, la presente Tesis Doctoral se encuadra en un área de investigación novedosa todavía en fase de desarrollo.

OBJETIVOS

Teniendo en cuenta lo que se ha expuesto, el propósito fundamental del trabajo que se presenta a continuación es establecer las bases de conocimiento necesarias para comprender el comportamiento de la bentonita como material de sellado de un almacenamiento de residuos radiactivos, para así poder modelizar su evolución durante el tiempo de operación del almacenamiento. Este objetivo se ha abordado de forma gradual, mediante una aproximación progresiva a través de los siguientes objetivos parciales:

- Desarrollar y poner a punto equipos y técnicas experimentales que permitan el estudio de materiales expansivos, en estado saturado y no saturado.
- Determinar las características físicas básicas de la bentonita de referencia utilizada en el Proyecto FEBEX como material de sellado.
- Caracterizar el comportamiento termo-hidro-mecánico de la bentonita sometida a las condiciones de la barrera.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta Tesis Doctoral se ha estructurado en una INTRODUCCIÓN, siete capítulos y una serie de ANEXOS.

El capítulo ANTECEDENTES sitúa este trabajo en el contexto internacional y nacional de la investigación sobre almacenamiento geológico profundo. En él se repasan los principales programas y proyectos de investigación sobre la barrera de arcilla para almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad llevados a cabo por la comunidad internacional. A continuación se describe el proceso de selección y caracterización inicial del material de sellado de referencia español. Finalmente, como hito avanzado del estudio de la barrera de arcilla en España, se exponen los rasgos generales del Proyecto FEBEX.

El capítulo MATERIAL describe el contexto geológico del yacimiento Cortijo de Archidona, el origen de la bentonita, y el procesado a que se sometió el lote extraído para el Proyecto FEBEX. Las características mineralógicas y químicas de este material, determinadas durante la fase inicial del Proyecto, también se resumen en este capítulo.

Se ha incluido un capítulo sobre el COMPORTAMIENTO TERMO-HIDRO-MECÁNICO DE ARCILLAS EXPANSIVAS, ya que son materiales que presentan particularidades cuyo estudio no se suele abordar de forma sistemática. El capítulo se inicia con una síntesis de las propiedades y del comportamiento hidro-mecánico de las esmectitas. Se describe también la configuración de la bentonita en una barrera de ingeniería y los procesos que se espera tengan lugar durante la fase transitoria de saturación. Por último, se hace una recopilación de las principales técnicas y desarrollos experimentales aplicados al estudio de materiales expansivos y subsaturados, incluyendo las técnicas de control de succión.

En el capítulo METODOLOGÍA se describen las técnicas experimentales aplicadas en este trabajo para la determinación de las características básicas de la bentonita, el estudio de la microestructura, y la determinación de la conductividad hidráulica, de la permeabilidad al gas, de la presión de hinchamiento, de la deformación al saturar y de la conductividad

térmica. Se explican también las técnicas de control de succión empleadas y su aplicación a la determinación de las curvas de retención y a la realización de ensayos edométricos con succión controlada. Este capítulo se complementa con los Anexos I a V, que recogen los procedimientos de ensayo detallados, elaborados según los requisitos del sistema de garantía de calidad del Proyecto FEBEX y de CIEMAT.

Los RESULTADOS obtenidos se presentan clasificados en cuatro subcapítulos: caracterización básica, hidráulica, mecánica y térmica. Las tablas de resultados y las figuras están incluidas en el texto, excepto los datos completos de los análisis porosimétricos y de los ensayos edométricos, que se recogen en los Anexos VI y VII. El capítulo RESULTADOS incluye también un subcapítulo en el que se realiza una discusión sobre el valor de la densidad del agua en la bentonita saturada, deducida a partir de los resultados de diversos ensayos.

Finalmente, las CONCLUSIONES del trabajo se exponen clasificadas en cuatro grupos: las referidas a los procedimientos y técnicas experimentales; las referidas a la caracterización y comportamiento termo-hidro-mecánico de un material expansivo; las conclusiones sobre el conocimiento de la barrera de arcilla; y las orientaciones para posteriores investigaciones.

Por último, las referencias bibliográficas utilizadas para la elaboración de esta memoria se reúnen en el capítulo BIBLIOGRAFÍA.

ANTECEDENTES

ANTECEDENTES

Los estudios de caracterización de una bentonita que se presentan en este trabajo se han realizado en un contexto muy preciso: el que pretende utilizar este material como aislante en los almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad. Por ello se han analizado sus características bajo determinados puntos de vista y condiciones representativas, que han condicionado toda la investigación. En las secciones siguientes se expone cuáles son las funciones del material de barrera, por qué se han elegido las bentonitas para este fin, y cómo ha evolucionado su estudio en este contexto, con especial referencia al caso español.

EL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE RESIDUOS RADIATIVOS

Se considera residuo radiactivo a cualquier sustancia que contiene o está contaminada con radionucleidos en concentraciones superiores a las establecidas por las autoridades competentes, para la cual no está previsto ningún uso. Se generan en la producción de energía eléctrica de origen nuclear, en la clausura de instalaciones nucleares y radiactivas y en la utilización de radioisótopos en industria, medicina, agricultura, investigación, etc. Desde el punto de vista de su almacenamiento definitivo, los residuos radiactivos se clasifican generalmente en residuos de baja y media actividad y residuos de alta actividad. Éstos últimos son aquéllos que tienen una elevada actividad específica en emisores de vida corta, contienen radionucleidos emisores alfa de vida larga en concentraciones apreciables y son grandes productores de calor (Echagüe et al. 1989).

La solución para proteger a las personas y el medio ambiente de las radiaciones que emiten los radionucleidos contenidos en los residuos radiactivos consiste en aislarlos de modo que, durante los periodos que permanezcan activos, no salgan a la biosfera por ninguno de los caminos posibles. La opción generalmente aceptada para el almacenamiento definitivo de los residuos de alta actividad (RAA) es el almacenamiento en formaciones geológicas profundas (500-1000 m) y estables (Goguel et al. 1987), como ya sugiriera la Academia

Nacional de Ciencias de Estados Unidos en la década de los 50. Para garantizar su aislamiento se interponen una serie de barreras naturales y artificiales (Figura 1):

1. La barrera química, que se constituye inmovilizando el residuo en una matriz sólida, estable y duradera, que sea químicamente inerte.
2. La barrera física, que es el contenedor donde se confinan los residuos inmovilizados, de gran resistencia a la corrosión.
3. La barrera de ingeniería, que es la instalación donde se colocan los residuos, constituida por una serie de cámaras, galerías y pozos en los que se alojan los contenedores. El diámetro de estas excavaciones es siempre superior al del contenedor, y el espacio sobrante se rodea de materiales apropiados que reciben el nombre de materiales de sellado, mientras que las cámaras y accesos quedan taponados por el material de relleno.
4. La barrera geológica, constituida por el medio geológico que alberga la instalación (sales, granitos, arcillas, basaltos o tobas volcánicas) y las formaciones geológicas circundantes.

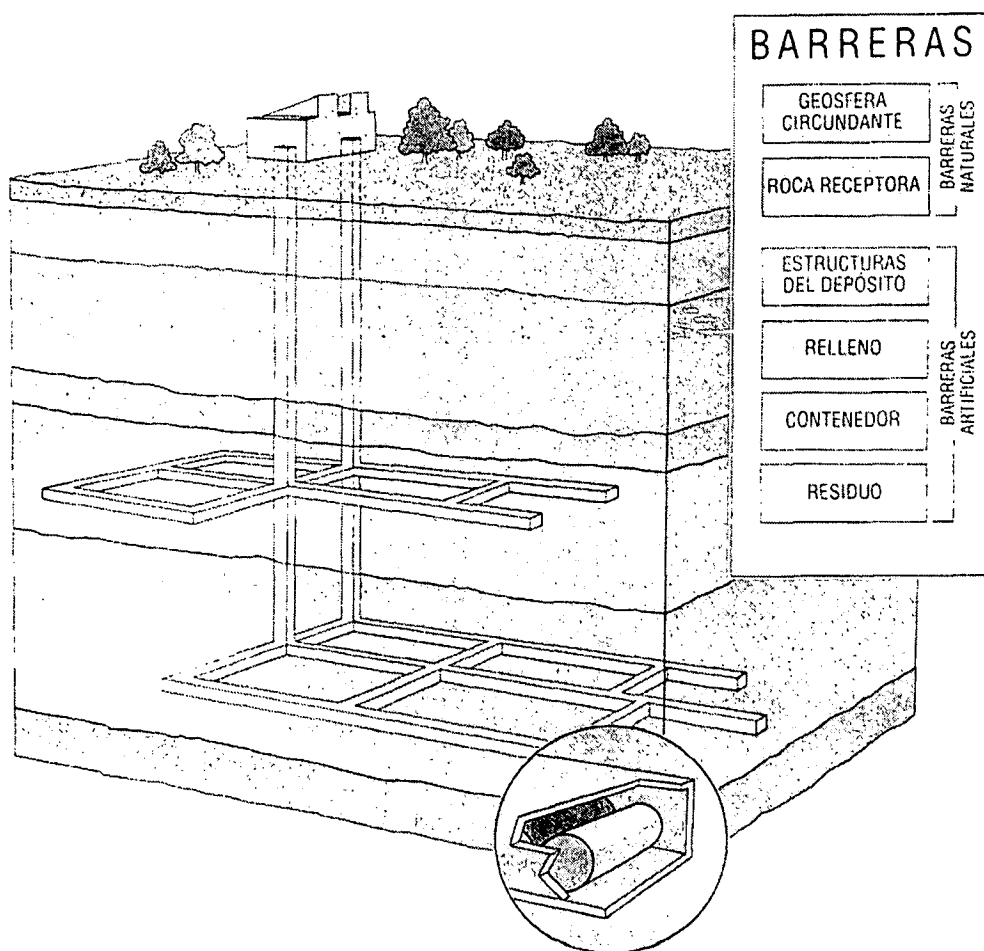


Figura 1: Esquema del concepto de barreras múltiples en un almacenamiento geológico

El sistema de barreras pretende suprimir las vías de escape de los radionucleidos al medio ambiente, de las cuales la más importante es la circulación de las aguas subterráneas. En este contexto, las funciones básicas del material de sellado son impedir o limitar la penetración de agua hacia los residuos y contribuir a la retención de los radionucleidos. Otras funciones añadidas son la de contribuir a la disipación de calor y la de aportar protección mecánica al contenedor de residuos.

LAS BENTONITAS COMO MATERIAL DE RELLENO Y SELLADO

Las bentonitas, son rocas compuestas de minerales arcillosos cristalinos formados a partir de la desvitrificación y alteración química acompañante de materiales ígneos vítreos,

normalmente tobas o cenizas volcánicas (Ross & Hendricks 1945). Los minerales arcillosos presentes en las bentonitas pertenecen al grupo de las esmectitas, entre las que la montmorillonita es la especie más común.

Atendiendo a las funciones del material de sellado que se han descrito en la sección anterior, Pusch (1979) propuso la bentonita sódica compactada a alta densidad en forma de bloques como material de sellado, ya que reúne las siguientes características:

- Permeabilidad muy baja, que reduce la percolación de agua subterránea, puesto que el transporte hidrogeológico es el principal mecanismo de transferencia de radionucleidos.
- Capacidad de intercambio alta, y por lo tanto elevada capacidad de adsorción iónica en el caso de liberación de los radionucleidos.
- Suficiente conductividad térmica, para evitar la generación de gradientes térmicos excesivos.
- Resistencia mecánica para soportar el peso del contenedor.
- Propiedades mecánicas que garanticen el carácter homogéneo de la barrera, lo que incluye un comportamiento plástico para evitar la formación de fisuras debidas a desplazamientos diferenciales o localización de tensiones, y potencial de hinchamiento para favorecer el autosellado de los huecos existentes.

Otros requisitos del material de barrera que han sido resaltados por investigaciones posteriores son (Yong et al. 1986):

- Buena compactabilidad, que asegure la facilidad de su procesado, manejo y transporte hasta el almacenamiento.
- Baja retracción frente al secado que probablemente ocurrirá en las proximidades del contenedor, para evitar la formación de una red de fisuras.
- Presión de hinchamiento no excesiva, para evitar daños en el sistema.

- Deformabilidad adecuada, que asegure que las presiones generadas por el macizo rocoso y por la hidratación del componente expansivo de la barrera sean absorbidas y aminoradas por la deformación de la propia barrera.
- Estabilidad física y química, que asegure la longevidad del sistema frente a las condiciones del almacenamiento, es decir, frente a la elevada temperatura, los gradientes químicos y la presencia de vapor (Tusch & Gray 1989, Güven 1990).

A partir de finales de los años 80, las agencias encargadas de la gestión de residuos en diferentes países han propuesto otros materiales de sellado, algunos con una composición basada en la utilización de cemento, pero la mayoría consideran el uso de bentonitas; bien de esmectitas no sódicas (ANDRA, Francia; ENRESA, España), o de mezclas de arcilla expansiva y agregados en diferentes proporciones. Como agregados se han ensayado granito molido (AECL, Canadá), basalto molido (DOE, Estados Unidos), ceolitas y cuarzo (JNC, Japón), cuarzo y grafito (ANDRA, Francia; ONDRAF/NIRAS, Bélgica). La adición de agregados inertes tiene como fin principalmente aumentar la conductividad térmica de la barrera, mejorar la resistencia mecánica de los bloques compactados y reducir el coste del material.

Aunque la mayoría de los estudios se han realizado considerando que el emplazamiento de la barrera tendrá lugar en forma de bloques pre-compactados, se han propuesto otros sistemas, como el uso de pellets de bentonita de elevada densidad combinados con bentonita en polvo, que una vez saturados y homogeneizada la densidad del conjunto, dan lugar a una densidad de barrera equivalente a la que se consigue con los bloques compactados (Salo & Kukkola 1989; Volckaert et al. 1996). La ventaja de este sistema está en la facilidad de su fabricación e instalación, sobre todo en emplazamientos en forma de pozo vertical.

ACTIVIDADES INTERNACIONALES EN EL CAMPO DEL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO: BARRERA DE ARCILLA

El diseño de almacenamientos geológicos para residuos radiactivos de alta actividad –de vida larga y emisores de calor– presenta problemas complejos, cuya solución se aborda principalmente mediante la colaboración internacional en proyectos de investigación interdisciplinarios. En esta sección se repasan algunas de las actividades realizadas por la comunidad internacional en esta área, con especial referencia a aquéllas relacionadas con la barrera de ingeniería y, en concreto, con el material de sellado.

En Estados Unidos, el Departamento de Energía (DOE) es responsable desde 1982 de la construcción y operación de un almacenamiento geológico para residuos de alta actividad. Por ello, en 1983 seleccionó nueve posibles emplazamientos en los que se hicieron estudios preliminares que condujeron, en 1985, a la elección de tres de ellos para realizar una caracterización intensiva: Hanford (Washington), Deaf Smith County (Texas) y Yucca Mountain (Nevada). En 1987 el Congreso determinó que los estudios se realizaran únicamente en este último, con lo que se constituyó el Proyecto de Caracterización de Emplazamiento Yucca Mountain (Yucca Mountain Project), cuyo objetivo es determinar si éste es un emplazamiento adecuado. Para ello se abordan estudios sobre la geología, hidrogeología, biología y climatología de la zona. En 1993 se comenzó la excavación de un laboratorio subterráneo a 300 m de profundidad en el que se investiga el sistema de fracturas, la respuesta de la roca frente a los esfuerzos y al calor, el movimiento de agua y vapor y la migración de radionucleidos. La instalación está excavada en toba volcánica, por encima del nivel freático. Se prevé que las galerías estén recubiertas de hormigón, y que los contenedores se coloquen sobre plataformas de hormigón con protecciones específicas contra la humedad.

Sin embargo, Japón, en su programa de gestión de residuos radiactivos de alta actividad, considera el concepto multibarrera para el almacenamiento geológico profundo. Debido a la compleja geología de este país –situado en una zona tectónicamente activa–, se pone especial énfasis en el papel del campo próximo. Se prevé excavar el almacenamiento a profundidad de 1000 m en el caso de roca dura y de 500 m en el caso de roca blanda, siendo

posible tanto la opción de galerías horizontales como de pozos verticales. Con respecto al material de sellado los principales estudios que se llevan a cabo se refieren a la resaturación del sistema de barreras, la deformación debida a la expansión del contenedor al corroerse, el asentamiento del contenedor, la estabilidad sísmica, la migración de gases, la extrusión del material de sellado en las fracturas de la roca hospedante, y la posibilidad de fabricar e instalar este material. Como material de sellado se ha elegido una mezcla de arena de cuarzo y bentonita en proporción 70/30 que se compacta hasta densidad seca de $1,6 \text{ g/cm}^3$, con un espesor de entre 0,4 y 0,7 m. En la mina de Kamaishi se han ensayado tanto los métodos de compactación *in situ* como la instalación de bloques. Además, existe una instalación subterránea de investigación en Gifu, denominada Mizunome, y en la central nuclear prototipo de Tokai se está construyendo una instalación para la investigación del Almacenamiento Geológico.

Así mismo, en Canadá se estudia el desarrollo de un método de almacenamiento permanente de residuos nucleares desde 1978. El concepto de almacenamiento prevé la excavación de una red de túneles, pozos y habitaciones en formaciones rocosas estables a profundidades de entre 500 y 1000 m. Los contenedores se colocarán en las habitaciones o en pozos perforados en ellas, y todos los huecos se rellenarán con el material apropiado. La investigación ha incluido la construcción de un laboratorio subterráneo excavado en el escudo granítico canadiense a 420 m de profundidad en las instalaciones de Whiteshell (Manitoba). En este laboratorio se monitoriza la migración subterránea de agua y contaminantes y se utilizan calentadores eléctricos para simular el calor generado por los residuos.

En Europa, entre 1977 y 1980 se desarrolló un proyecto sueco-americano (SAC, Swedish American Cooperation) en la mina de hierro excavada en granito de Stripa (Suecia). El Proyecto constó de tres partes principales: experimentos de calentamiento con contenedores de residuos simulados, evaluación de la hidrología de fisuras, y medidas geofísicas. Se obtuvo una extensa información sobre las reacciones mecánicas de la roca frente al calor y sobre el flujo de agua en un medio cristalino fisurado. Estos resultados atrajeron la atención de otros países y, hacia 1980, comenzó el proyecto internacional Stripa, una actividad autónoma de OCDE para el desarrollo y prueba de técnicas para aislar residuos radiactivos de alta actividad, en el que las naciones participantes fueron Canadá, Finlandia,

Francia, Gran Bretaña, Japón, Suecia y Estados Unidos. El Proyecto estaba encabezado por SKB –la compañía sueca para gestión de combustible y residuos nucleares–, e incluyó estudios geofísicos, geoquímicos e hidrogeológicos, así como ensayos de campo de sellado de residuos radiactivos simulados con materiales arcillosos. El Proyecto se realizó en dos fases sucesivas: entre 1980 y 1985, y entre 1986 y 1991. Entre los ensayos de más alcance que se llevaron a cabo en la mina de Stripa destaca, por su innovación y por la repercusión que ha tenido sobre investigaciones posteriores, el llamado Buffer Mass Test (BMT). El objetivo general del BMT fue comprobar el comportamiento bajo condiciones reales de ciertos materiales de sellado basados en el uso de bentonita, así como las técnicas para su preparación, manejo e instalación (Pusch et al. 1985). El ensayo estaba localizado en una galería de 30 m de longitud a 340 m de profundidad en la mina de Stripa, y constaba de seis sondeos de unos 3 m de profundidad y 0,76 m de diámetro, en los que se alojaban calentadores eléctricos rodeados de bloques de bentonita sódica compactada no saturados. La potencia de los calentadores simulaba la producción de calor del contenedor de residuos (125 °C). Parte de la galería se rellenó con una mezcla de arena/bentonita compactada *in situ*, y los pozos no situados en esta parte de la galería se taponaron con una mezcla de arena/bentonita cubierta por una losa de hormigón de 1,6 m de espesor (Figura 2). Durante el ensayo se monitorizaron las temperaturas, presiones de hinchamiento y la presión de agua en la roca granítica y en el material de sellado, así como la humedad de la arcilla, los desplazamientos relativos entre los diferentes componentes y las variaciones en la apertura de fracturas.

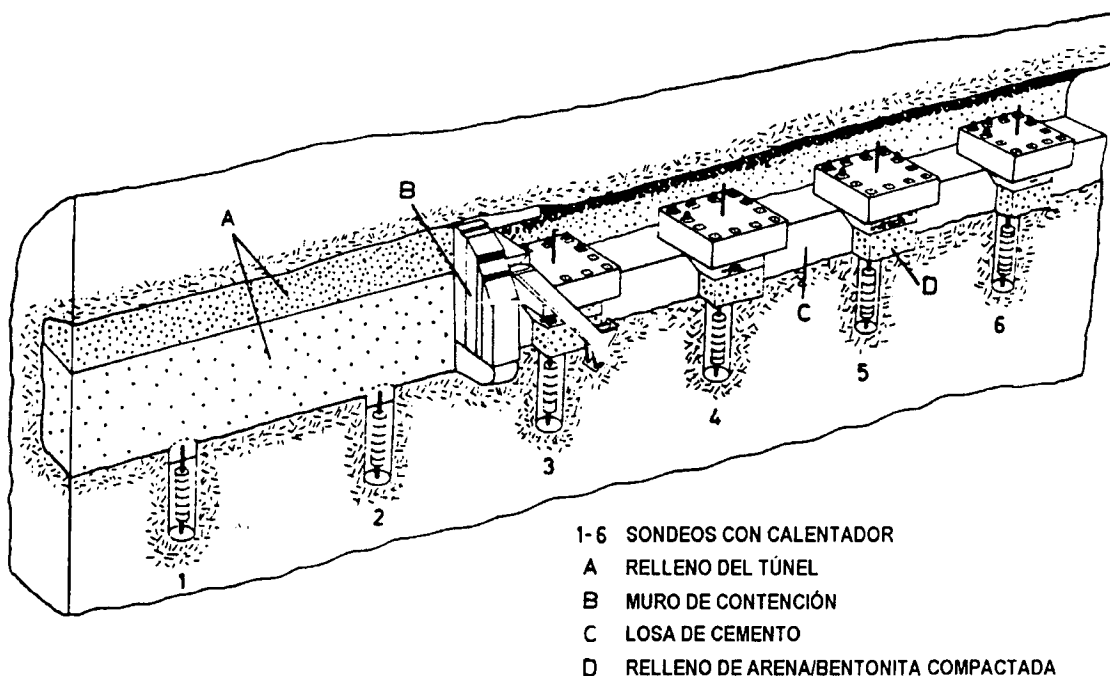


Figura 2: Esquema del Buffer Mass Test en Stripa (Pusch et al. 1985)

Después de un año de ensayo se determinaron en laboratorio las propiedades físicas (microestructura, presión de hinchamiento, conductividad hidráulica) y químicas del material que había estado sometido a gradientes termo-hidráulicos, para comparar los resultados con los obtenidos en muestras no tratadas. No se observaron modificaciones en las propiedades hidro-mecánicas, y se comprobó también la integridad química de la bentonita tras un año de calentamiento a 125 °C.

Tras el cierre de la mina de Stripa, SKB inició la construcción, finalizada en 1995, de un laboratorio subterráneo hasta una profundidad de 450 m en el granito de Äspö, con el objeto de ensayar los métodos de investigación de la roca a la profundidad de un almacenamiento de residuos radiactivos (Figura 3). Existe un programa conjunto de investigación en este laboratorio en el que participan Japón, Francia, Finlandia, Gran Bretaña, Suiza, Alemania, España, Canadá y Estados Unidos (Kärnbränslehantering 1999). Entre los proyectos realizados en Äspö, relacionados con la barrera de bentonita, se encuentran ensayos de prueba de diferentes materiales de relleno; el proyecto “Prototye”, en el que se construirá un almacenamiento simulado con material de relleno y sellado; y el proyecto “Long term tests of buffer material (LOT)”. Este último es un ensayo *in situ*,

según el concepto de almacenamiento sueco pero a escala reducida, dirigido a la comprobación de la efectividad de la barrera a largo plazo desde el punto de vista microbiológico, de transporte de radionucleidos, de corrosión y de transporte de gas (Karnland 1996).

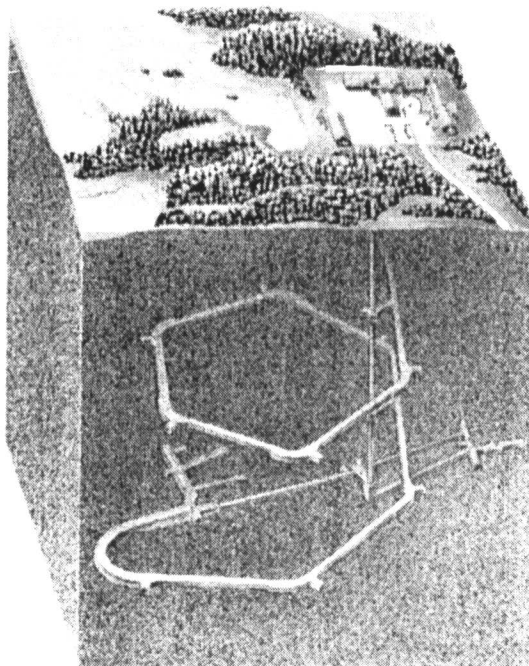


Figura 3: Esquema del laboratorio subterráneo de Äspö (Kärnbränslehantering 1999)

La instalación subterránea para la investigación del almacenamiento de residuos nucleares HADES, en Mol (Bélgica), es la única de su género construida en una formación arcillosa (Figura 4). Está localizada a 200 m de profundidad en la formación conocida como “arcilla de Boom”, y forma parte de la instalación nuclear de la compañía SCK·CEN. HADES es además un programa interdisciplinar para la demostración de la factibilidad y seguridad a largo plazo del almacenamiento de residuos radiactivos que, aunque siguiendo los criterios de la agencia belga NIRAS/ONDRAF, ha estado apoyado por la Comunidad Europea desde 1975, por lo que cuenta con participación internacional en varios de los proyectos adscritos.



Figura 4: Imagen de la instalación subterránea HADES (Mol)

La Unión Europea también ha tenido en cuenta en sus actividades de investigación la cuestión de la gestión y el almacenamiento de residuos radiactivos. En su mayor parte, las actividades de investigación de la Unión Europea se llevan a cabo dentro de los programas marco de investigación, desarrollo tecnológico y demostración (IDT) plurianuales. Estos proyectos de investigación se realizan por organismos públicos y privados pertenecientes a los países miembros, mediante un sistema de financiación parcial (shared-cost). Los estudios relacionados con la gestión de residuos radiactivos se encuadraron entre 1985 y 1994 en el Programa “Management and Storage of Radioactive Waste”. A partir de 1995 todos los proyectos relacionados con la energía nuclear pasaron a englobarse dentro del Programa “Investigación y formación en el sector de la energía nuclear: Seguridad de la fisión nuclear (NFS2)”. La participación en estos proyectos supone para la comunidad científica la posibilidad de intercambiar información, tanto a través de las reuniones periódicas que tienen lugar, como mediante los informes de avance y la publicación de los informes finales en forma de EUR. Así mismo, la Unión Europea, en colaboración con la OCDE, organiza al final de cada Programa Marco un Workshop sobre sellado de residuos radiactivos en el que se recogen los principales resultados obtenidos en los diferentes proyectos de investigación (Braunschweig 1989, Luxemburgo 1990 y 1996...).

En el programa comprendido entre 1985 y 1989 se comenzaron actividades conjuntas en la mina de sal de Asse (Alemania) y en la instalación HADES de Mol (Bélgica). En esta última se excavó una galería experimental en la que se ensayaron diferentes tipos de recubrimiento (lining), se inició un ensayo de calentamiento/radiación (Proyecto CERBERUS), y el proyecto “Backfilling control experiment for high level wastes in underground storage” (BACCHUS-1), que consistió en el sellado, mediante bloques compactados obtenidos a partir de una mezcla de la bentonita francesa FoCa, cuarzo y grafito, de un pozo excavado en la arcilla de Boom en el que se colocó un calentador central (Neerdael et al. 1992).

Durante el período 1990-1994 se incluyeron en el III Programa Marco proyectos tanto sobre gestión de residuos como sobre construcción y operación de instalaciones subterráneas (European Commission 1995). Esta última parte del programa tenía como objetivo principal el desarrollo y demostración de las técnicas de instalación, y la validación de la localización y de los criterios de diseño de almacenamientos geológicos profundos, tanto en sal como en arcilla. Los proyectos referidos al almacenamiento en formaciones salinas se centraron en la mina de Asse (Alemania), y en menor medida en la mina de potasa de Amélie (Francia). Los aspectos relacionados con el almacenamiento en formaciones arcillosas se estudiaron principalmente en la instalación subterránea de Mol (Bélgica), aunque también se desarrolló un proyecto de investigación en el túnel excavado en argilitas de Tournemire (Francia), en el que el IPSN (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire) trabajaba desde 1988. Además de los ensayos *in situ*, todos los proyectos se complementaron con programas de ensayos de laboratorio. Entre los proyectos centrados en el laboratorio subterráneo de Mol, el Proyecto BACCHUS-2 “Demonstration of the *in situ* application of an industrial clay-based backfill material” estaba enfocado a la demostración y mejora de un procedimiento de instalación de un material de sellado basado en arcilla, y a la validación de un modelo hidro-mecánico. Este material estaba constituido por una mezcla de pellets de alta densidad y polvo de la misma arcilla de Boom. Paralelamente al Proyecto BACCHUS-2, y en estrecha colaboración, se desarrolló el Proyecto “Modelling and validation of the thermal-hydraulic-mechanical and geochemical behaviour of the clay barrier”, con el objetivo de analizar y modelizar el comportamiento de una barrera de ingeniería arcillosa durante la fase de hidratación en las

condiciones reales del almacenamiento. Para ello se desarrollaron modelos acoplados termo-hidro-mecánicos y termo-hidro-químicos que simulan la distribución espacial y evolución de temperatura, humedad, succión, esfuerzos, deformación y concentración de especies químicas. Los trabajos de laboratorio, llevados a cabo por varias organizaciones (SCK-CEN, CIEMAT, CEA y UPC) en el contexto de este Proyecto, permitieron la adquisición de parámetros requeridos por los modelos y la identificación de procesos que tienen lugar durante el transitorio (Volckaert et al. 1996).

En el área “Gestión y almacenamiento de residuos radiactivos y desmantelamiento” del IV Programa Marco (Subprograma “Seguridad de la fisión nuclear”), desarrollado entre 1994 y 1998, las investigaciones relacionadas con el almacenamiento de residuos radiactivos se englobaron bajo los epígrafes “Laboratorios subterráneos para el almacenamiento de residuos” e “Investigación de apoyo”. Una revisión de los proyectos contenidos en estas áreas muestra cuáles son los aspectos considerados prioritarios por la Unión Europea:

- Comportamiento geomecánico de las barreras de ingeniería y las rocas almacén.
- Ensayo y demostración de conceptos de almacenamiento.
- Estudios de análogos y sistemas naturales.
- Generación y transporte de gas.
- Caracterización de las formas del residuo y matrices.

Los proyectos referidos al estudio del comportamiento geomecánico de las barreras incluyen también su estudio desde el punto de vista microestructural y el estudio de los parámetros químicos (tanto del sólido como del agua subterránea) relacionados con su eficacia como material de sellado (Proyecto “Microestructural and chemical parameters of bentonite as determinants of waste isolation efficiency”). Otro aspecto que se considera es el de las modificaciones provocadas por la interacción entre la bentonita y el cemento utilizado para taponar parte de la galería en algunos conceptos de almacenamiento, y su repercusión sobre el comportamiento del material de sellado (Proyecto ECOCLAY). Por otra parte, los proyectos de demostración de conceptos de almacenamiento son ensayos *in situ* en los que, a escalas reales o próximas a ellas, se simula parte de un almacenamiento con sus diferentes componentes. Con el objeto de estimular la cooperación y el

intercambio de información, la Comisión Europea ha establecido un grupo de coordinación de las actividades y proyectos llevados a cabo en los diferentes laboratorios subterráneos llamado CLUSTER (Club of Underground Storage Testing and Research facilities), que comprende las instalaciones HADES en Mol (Bélgica), la mina de sal de Asse (Alemania), la mina en granito de Grimsel (Suiza), el túnel en argilitas de Tournemire (Francia) y el laboratorio en granito de Äspö (Suecia) (Haijink & Davies 1998). Entre los proyectos incluidos se encuentran RESEAL y FEBEX. El Proyecto RESEAL, encabezado por la compañía belga SCK-CEN y con participación francesa y española, es una demostración a gran escala de la posibilidad de sellar un pozo vertical en una formación arcillosa mediante una mezcla de pellets y polvo de la bentonita francesa FoCa. El Proyecto FEBEX, liderado por ENRESA, ha sido el primer ensayo a escala real de simulación de un almacenamiento en galería en roca granítica, construido según se describe con detalle en la siguiente sección. Además de un ensayo *in situ* según el concepto español, el Proyecto FEBEX consta de un ensayo en maqueta a escala casi real, y de un conjunto de ensayos de laboratorio.

Por otra parte, y fuera del marco de financiación de la Unión Europea, en la instalación subterránea HADES de Mol, se está llevando a cabo el proyecto PRACLAY de simulación a escala real de una galería de almacenamiento según el concepto belga: en una galería de 2 m de diámetro y 30 m de longitud recubierta de hormigón, un tubo central de 0,5 m de diámetro de acero inoxidable, en el que unos calentadores eléctricos simulan los residuos, se verá recubierto por bloques de bentonita compactada. Con anterioridad a este ensayo se inició a finales de 1997 un ensayo en maqueta en una instalación en superficie, en el que las dimensiones longitudinales del sistema se han reducido a 5 m (Figura 5).

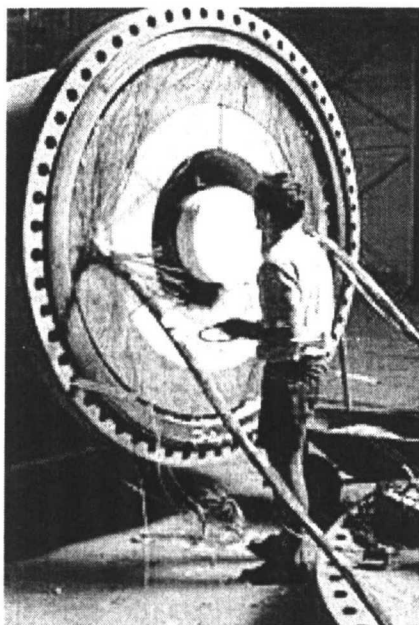


Figura 5: Vista del ensayo en maqueta del Proyecto PRACLAY antes de instalar la tapa

Como hemos visto, desde los años 80 se ha dedicado gran atención al desarrollo de ensayos a diferentes escalas, tanto de laboratorio como de campo, para observar los procesos termo-hidro-mecánicos en las barreras de ingeniería y en el medio geológico. El propósito de estos experimentos es la observación directa de los fenómenos que tienen lugar en la barrera y del comportamiento del sistema, con lo que se aporta la información necesaria para verificar y validar los modelos matemáticos de los procesos acoplados y su implementación numérica. El resultado de estas actividades permitirá el desarrollo de modelos de confianza que puedan predecir la respuesta termo-hidro-mecánica y geoquímica de las barreras de ingeniería y naturales, en las escalas de tiempo que el almacenamiento de residuos radiactivos precisa. Con este fin se han propuesto algunos ejercicios de validación de modelos (benchmarks), en los que se contrastan las predicciones de diferentes modelos para un mismo caso real de complejidad creciente, desde la escala de ensayos simples de laboratorio hasta la de complejos ensayos *in situ*. Entre éstos, el Proyecto INTERCLAY II, desarrollado en el marco del Programa de IDT de la Comunidad Europea 1990-1994, en el que participaron diez organizaciones de Reino Unido, Bélgica, Francia y España, estaba dedicado al comportamiento reológico de arcillas como formación hospedante. Entre 1996 y 1998, el Proyecto CATSIUS CLAY “Calculation and testing of behaviour of unsaturated clay”, coordinado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (España), analizó las predicciones de

varios códigos hidro-mecánicos y termo-mecánicos sobre el comportamiento de arcillas no saturadas sometidas a condiciones próximas a las de la barrera de un almacenamiento. Entre los casos estudiados se encuentran el ensayo BACCHUS-2, el ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX, y un ensayo en celda termohidráulica realizado en CIEMAT con la arcilla española de referencia (*cf.* sección “Estudios de comportamiento THM de la bentonita S-2 (1991-1995)”).

El interés suscitado por los estudios relacionados con el almacenamiento geológico de residuos radiactivos ha dado lugar –a parte de a numerosos artículos en revistas científicas– a foros internacionales de discusión de aspectos concretos del comportamiento del sistema. En particular, son de interés una serie de Workshops iniciada en Lund (Suecia) en 1988, cuyo objetivo es la reunión de investigadores con intereses relacionados con las barreras arcillosas de ingeniería propuestas para el almacenamiento geológico de residuos nucleares, y en los que se presentan revisiones actualizadas de cada área en particular. Un tema común a todos ellos ha sido la consideración de los procesos termo-hidro-mecánicos en estas barreras (Selvadurai 1997), aunque cada uno de estos Workshops se focalizó en un aspecto concreto:

- Lund (Suecia) 1988: “Longevidad y reología de esmectitas”. Las presentaciones referidas a la geotecnia de esmectitas remoldeadas, en concreto a la medida de su conductividad hidráulica, fueron contribuciones pioneras en esta área.
- Durham (Estados Unidos) 1991: “Reparto de esfuerzos en arcillas”, incluyendo aspectos de la interacción suelo/agua, del esfuerzo efectivo en arcillas expansivas, del comportamiento de arcillas no saturadas y del flujo de agua y contaminantes. Se presentó un modelo conceptual para el comportamiento de suelos expansivos no saturados que ha tenido gran difusión (Gens & Alonso 1992).
- Bergamo (Italia) 1993: “Termo-mecánica de arcillas y barreras arcillosas”, explorando los aspectos microestructurales y la influencia de la temperatura y del estado de saturación, tanto desde el punto de vista experimental como teórico.

- Montreal (Canadá) 1995: “Hidro-termo-mecánica de barreras arcillosas de ingeniería y barreras geológicas”, con especial énfasis en la modelización y en los ejercicios de verificación y validación de modelos.
- Barcelona (España) 1998: “Aspectos claves en la investigación del almacenamiento de residuos”. El número de áreas de interés fue más amplio en esta ocasión: fenómenos hidráulicos, mecánicos y químicos, ensayos *in situ* y en maqueta a gran escala, juntas entre fracturas e interfases, avances en técnicas de laboratorio, generación y migración de gas.

Las ponencias presentadas en estos grupos de trabajo se revisan y seleccionan para ser incluidas en un Número Especial de alguna revista internacional como Canadian Geotechnical Journal (vol. 29), Engineering Geology (vol. 28 n. 3-4, vol. 41 n. 1-4, vol. 47 n. 4), e International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics (vol. 22 n. 1 y 7, vol. 23 n. 12).

Recientemente se ha empezado a remarcar la importancia de los aspectos microestructurales en el comportamiento de las arcillas utilizadas como barrera, lo que ha quedado plasmado en un primer Workshop celebrado en Lund en 1998: “Microstructural modelling with special emphasis on the use of clays for waste isolation”, cuyas contribuciones se reunieron también en un Número Especial de la revista Engineering Geology (vol. 54 n. 1-2).

EL ESTUDIO DE LAS BARRERAS DE ARCILLA EN ESPAÑA

La creación de ENRESA en 1984 marcó el inicio de una nueva etapa en la investigación sobre el almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad en España. En 1990 comenzaron una serie de actividades encaminadas a la definición de un sistema de almacenamiento adecuado al caso español, encuadradas dentro del Proyecto AGP (Almacenamiento Geológico Profundo), cuyo objetivo básico es “evitar cualquier tipo de daño por causa radiológica al hombre y su ambiente, utilizando la estrategia de concentración y confinamiento del residuo”. Las formaciones geológicas consideradas son:

granito, arcilla y sal. Se prevé el almacenamiento definitivo de los RAA en contenedores, colocados en el centro de las galerías de un almacenamiento excavado en profundidad y rodeados de un material de sellado, según se muestra en la Figura 6 para el caso del granito. La función que se atribuye al material de sellado que rodea la cápsula es la de reducir el flujo de aguas subterráneas y el transporte de sustancias corrosivas, establecer un ambiente físico-químico adecuado en el entorno de las cápsulas y proporcionarles protección mecánica frente a posibles movimientos de la roca. Por lo tanto, las propiedades que debe satisfacer el material de sellado son fundamentalmente baja permeabilidad y difusividad, buena conductividad térmica, elevada capacidad de sorción y estabilidad a largo plazo (ENRESA 1994, 1995).

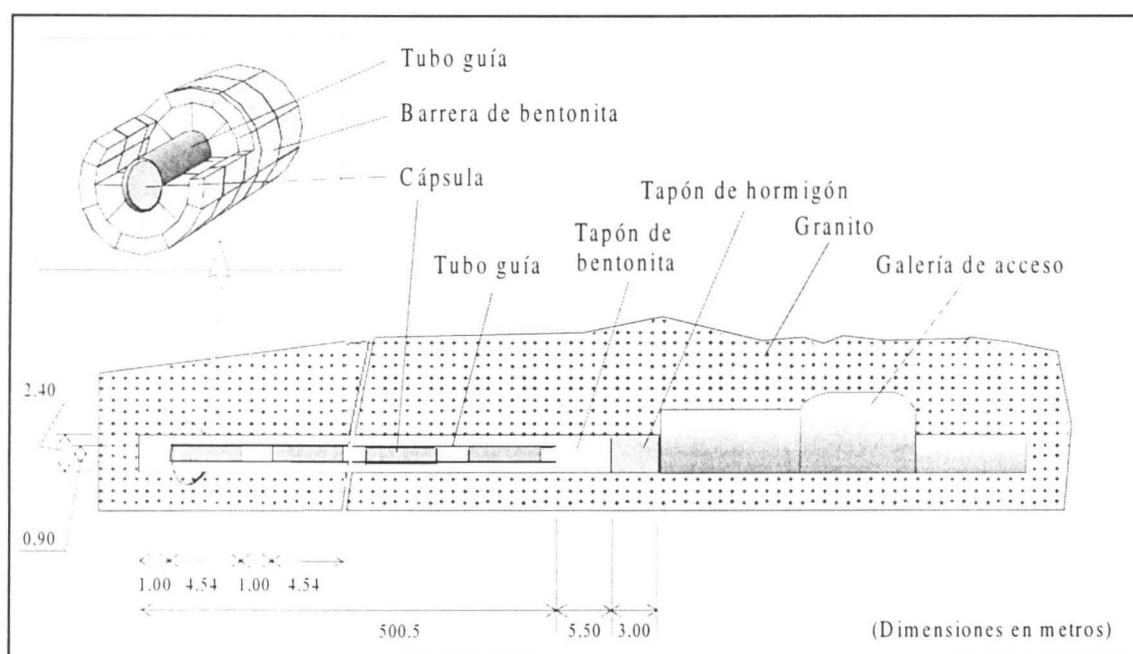


Figura 6: Sección longitudinal de una galería de almacenamiento en el concepto de referencia español en granito (ENRESA 1997)

Las investigaciones relacionadas con el AGP abarcan desde la prospección de zonas favorables para la instalación de almacenamientos, hasta el estudio del comportamiento del combustible y la cápsula, pasando por la caracterización de emplazamientos (estructural, hidrogeológica, geoquímica e hidrogeoquímica, de migración de radionucleidos) y por los estudios sobre el papel de las barreras de ingeniería. Estos proyectos de investigación se han llevado a cabo en muchas ocasiones siguiendo las pautas y en colaboración con organismos equivalentes de otros países europeos.

El Proyecto AGP ha considerado la bentonita compactada como material de sellado de los bultos en el caso de formaciones saturadas (arcilla y granito) y una mezcla de arena y materiales arcillosos como relleno de las galerías y cavidades. La densidad seca considerada para el receptáculo de bentonita que envuelve la cápsula de almacenamiento es de $1,65 \text{ g/cm}^3$. La capa de bentonita tendrá un espesor de 0,75 metros, y la temperatura en ella no superará los 100°C . En base a estudios de idoneidad, en los que CIEMAT participó activamente desde el primer momento, se eligió como material de sellado de referencia una bentonita explotada en la provincia de Almería. En las secciones siguientes se hace una recapitulación de lo que ha sido la prospección, selección y estudio del comportamiento de materiales adecuados para la construcción de barreras arcillosas de ingeniería en España, con especial hincapié en el trabajo realizado en CIEMAT y resumiendo brevemente los principales resultados de cada fase de investigación.

Prospección y selección inicial (1987-1989)

El estudio de materiales de relleno y sellado se comienza en España en 1987, con un Proyecto financiado por la Comunidad Europea (FI-IW-0191E), realizado por CIEMAT y participado por ENRESA. En este estudio se plantean tres objetivos:

- Conocer la disponibilidad en España de arcillas idóneas como material de relleno y sellado.
- Estudiar la posibilidad de utilizar arcillas ílticas como alternativa a las arcillas esmectíticas, para minimizar el desequilibrio mineralógico con el ambiente granítico.
- Utilizar la roca granítica molturada como aditivo de la arcilla para material de relleno, lo que podría aminorar los costes y contribuir a la reconstitución del entorno del almacenamiento.

Realizada la prospección de materiales arcillosos en España, se inicia el estudio de 30 muestras provenientes de siete suministradores ubicados en Gerona, Barcelona, Zaragoza, Segovia, Toledo, Jaén y Almería. Una primera determinación semicuantitativa de la mineralogía permitió excluir el 50 % de las muestras recibidas debido a su bajo contenido en filosilicatos (menor del 65 %). De acuerdo con la mineralogía de la fracción menor de 2

µm, se seleccionaron siete de estas muestras; dos de ellas estaban constituidas mayoritariamente por illita, y el resto eran esmectitas provenientes de la región de Cabo de Gata (Almería) y de la Cuenca de Madrid (Yuncos, Toledo) suministradas por Minas de Gádor. Finalmente, entre ellas se seleccionaron dos arcillas que no habían sido sometidas a tratamiento en fábrica: una bentonita denominada “Serrata natural” (M-26) proveniente del yacimiento Cortijo de Archidona, en Almería, y una illita, proveniente de Zaragoza (M-15), por su bajo contenido en carbonatos y minerales coloidales, y elevada plasticidad y compactabilidad. El análisis de las propiedades mecánicas, hidráulicas, térmicas y físico-químicas de ambas y su comportamiento al ser mezcladas con granito molido permitieron llegar a las siguientes conclusiones (Mingarro et al. 1991):

- Existen arcillas en España que podrían utilizarse como material de relleno y sellado.
- Es aconsejable la utilización de la arcilla esmectítica y no la de la arcilla illítica como material de relleno y sellado, debido a su mayor presión de hinchamiento, superficie específica y capacidad de cambio catiónico.
- Puede utilizarse el granito molturado como aditivo de la esmectita en el material de relleno, pero sin sobrepasar el 25% de la mezcla.

Paralelamente, ENRESA promueve el estudio de dos zonas españolas con yacimientos importantes de arcillas esmectíticas que podrían ser utilizadas como materiales de relleno y sellado en un futuro almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad. Estas zonas fueron la región volcánica de Cabo de Gata en Almería y la Cuenca Terciaria de Madrid en la provincia de Toledo. De cada una de ellas se seleccionaron tres yacimientos, considerados potenciales futuros aprovisionamientos de material por las características que ya se conocían y por las reservas estimadas, para ser estudiados conjuntamente por CIEMAT, la Estación Experimental del Zaidín del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC-Zaidín) para la zona del Cabo de Gata, y la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) para la zona de la Cuenca de Madrid, con el asesoramiento de R. Pusch (Clay Technology, Suecia). Además, CIEMAT contó con la colaboración del Commissariat à l’Energie Atomique (CEA, Francia). Para la zona de Cabo de Gata los yacimientos seleccionados fueron Cortijo de Archidona, en la Serrata de Níjar, Morrón de Mateo, en la Rambla de los Escullos y Los Trancos, en la zona norte de la Sierra de Gata. De la Cuenca

de Madrid se seleccionaron los yacimientos de Cerro del Águila-Cerro del Monte, Santa Bárbara y Yuncos.

En el CIEMAT se recibieron dos muestras por yacimiento de 200 kg cada una. De cada una de estas muestras se determinó la distribución granulométrica y el peso específico, la mineralogía y geoquímica, los límites de Atterberg, y la superficie específica total y externa. Así mismo se realizaron ensayos de compactación de tipo dinámico y estático. En los laboratorios de CEA se determinó la conductividad térmica superficial en muestras compactadas. Los resultados obtenidos se recogen en (Rivas et al. 1991) y Pérez del Villar (1989a y b).

Por su parte, CSIC-Zaidín, para la zona de Cabo de Gata, y la UAM, para la zona de la Cuenca de Madrid, realizaron una completa caracterización geoquímica y mineralógica y un estudio de alterabilidad y estabilidad sobre varias muestras recogidas en los mismos yacimientos. Los resultados obtenidos se recogen en informes publicados por ENRESA y por la Comunidad Europea (Linares et al. 1993, Cuevas 1992, Astudillo et al. 1995).

Atendiendo a los resultados obtenidos por todos los laboratorios, se seleccionó un yacimiento de cada zona, el de Cortijo de Archidona en Cabo de Gata, constituido mayoritariamente por esmectita de tipo montmorillonita, y el de Cerro del Águila-Cerro del Monte en la cuenca terciaria de Madrid, constituido fundamentalmente por esmectita de tipo saponita, acompañada de proporciones variables de illita y sepiolita. Los criterios tenidos en cuenta para su selección fueron aquéllos que son indicativos de la aptitud del material para satisfacer los requisitos del material de relleno y sellado en un almacenamiento de RAA: pureza mineralógica, elevada superficie específica, límite líquido elevado, proporción alta de fracción menor de 2 μm , elevada conductividad térmica y buena compactabilidad, como requisito añadido de cara a la fabricación de bloques de alta densidad (Rivas et al. 1991).

Selección del yacimiento Cortijo de Archidona (Almería) (1989-1991)

Sobre las dos arcillas seleccionadas, de referencia S-2 (Cortijo de Archidona en la Serrata de Níjar) y MCA-C (Cerro del Águila-Cerro del Monte en la provincia de Toledo)

CIEMAT continuó la caracterización de sus propiedades físico-químicas y su alterabilidad. Para ello se dispuso de una muestra de 5000 kg de cada yacimiento secada a 60°C hasta humedad próxima al 10% y molida a tamaño inferior a 5 mm en fábrica. Para su utilización en laboratorio la muestra se molía hasta tamaño menor de 2 mm (excepto en aquellos casos en que se buscaba determinar el efecto de la granulometría en alguna propiedad) y se estabilizaba en las condiciones de temperatura y humedad del laboratorio (18-25 °C, 50-60% H.R.). Parte de esta muestra preparada fue enviada a los laboratorios de CSIC-Zaidín (la S-2), UAM (la MCA-C) y CEA.

La caracterización llevada a cabo en CIEMAT incluyó ensayos para la determinación de parámetros y el discernimiento de la influencia sobre las diferentes propiedades de la densidad seca y la humedad de la muestra, de la temperatura de la determinación, del tamaño máximo de grano empleado, de la adición de arena de cuarzo en diferentes proporciones y del precalentamiento a diferentes temperaturas de la arcilla utilizada. En ambas arcillas se realizaron los siguientes estudios:

- Estudio de la compactación dinámica por golpeo manual y semiautomático y de la compactación estática en prensa uniaxial: determinación de humedades óptimas, presiones necesarias, influencia de la granulometría y de la adición de arena de cuarzo en diferentes proporciones sobre la densidad final.
- Resistencia a la compresión simple: influencia de la densidad seca y la humedad de las probetas, de la granulometría utilizada y de la adición de diferentes proporciones de arena de cuarzo.
- Hinchamiento libre.
- Presión de hinchamiento: análisis de la influencia de la densidad seca y de la proporción de arena de cuarzo.
- Conductividad hidráulica saturada para diferentes densidades secas, proporciones de arena de cuarzo y temperaturas de medida.
- Conductividad térmica: análisis de la influencia de la densidad seca, de la humedad y de la proporción de arena de cuarzo.
- Ensayos edométricos: estudio de la consolidación de la arcilla.

- Ensayos triaxiales.
- Estudio de la difusión de iones: determinación de coeficientes de distribución.
- Determinación de las isothermas de adsorción-desorción.
- Estudio de la alterabilidad hidrotermal: influencia del tiempo y temperatura de tratamiento y de la concentración de KCl.

Los límites de Atterberg, la presión de hinchamiento, la resistencia a la compresión simple y la conductividad hidráulica se determinaron también en muestra sometida previamente a calentamiento a 100, 200 y 300°C. También se determinaron las modificaciones originadas por el calentamiento sobre la mineralogía, peso específico, superficie específica externa y sobre la textura observada al microscopio electrónico.

Estos estudios y sus resultados se recogen en Rivas et al. (1991), Pérez del Villar et al. (1991) y Villar & Dardaine (1990) y permitieron la selección definitiva de la montmorillonita de Cortijo de Archidona, de referencia S-2, por su mejor densificación y menor repercusión térmica, aunque ambas arcillas satisfacen los requisitos para ser utilizadas como material de barrera. Las conclusiones extraídas durante esta fase son:

- Tanto la compactación uniaxial como dinámica son adecuadas para la producción de bloques compactados de alta densidad.
- La distribución de tamaño de grano no modifica la densidad final de los bloques.
- La adición de arena de cuarzo no introduce grandes mejoras en las propiedades del material.
- La conductividad hidráulica saturada (k_w) y la presión de hinchamiento (P_s) dependen de la densidad seca de la arcilla (ρ_d), siguiendo una relación exponencial (Villar & Rivas 1994). Una densidad seca de 1,60 g/cm³ satisface los requerimientos hidráulicos de la barrera.
- La temperatura aumenta la conductividad hidráulica de la arcilla, pudiendo ser explicado este aumento por la disminución de viscosidad cinemática del agua.
- La conductividad térmica del material aumenta al aumentar la densidad seca y la humedad.

Simultáneamente, bajo contrato con CEA, se realizaron ensayos de compactación uniaxial de tipo industrial con ambas arcillas, en colaboración con la sociedad Constructions Thermiques Européennes (Montsemprom-Libos, Francia), cuyos resultados se pueden encontrar en Martín & Dardaine (1990) y Martín et al. (1990), y un ensayo de validación de barrera de arcilla en pozo vertical realizado en Fanay-Silord con la arcilla S-2 (Astudillo et al. 1995).

Estudios de comportamiento THM de la bentonita S-2 (1991-1995)

En 1991 se inició la segunda fase de caracterización de la arcilla S-2 proveniente del yacimiento de Cortijo de Archidona, encuadrada dentro del Anexo V del Convenio de Asociación CIEMAT-ENRESA “Investigación y desarrollo tecnológico en el campo de la migración de radionucleidos y comportamiento de barreras naturales y artificiales frente a la migración” en su Anexo C “Estudios básicos de comportamiento térmico, hidráulico y mecánico de materiales de barreras artificiales”. Para ello se dispuso de 24 t de bentonita suministradas por Minas de Gádor en octubre de 1990, preparadas en su planta de Almería mediante secado a 60 °C y molido a tamaño inferior a 5 mm. Para su uso en los laboratorios del CIEMAT el material se volvía a moler a tamaño inferior a 2 mm.

Durante esta fase se acometió la caracterización de las propiedades y comportamiento del material en las condiciones en las que se verá una vez emplazado en el almacenamiento, es decir al ser sometido durante períodos de tiempo largos a calentamiento e hidratación simultáneos por frentes opuestos. Esto incluye el estudio de los efectos producidos por el flujo termohidráulico en bloques compactados y el estudio del comportamiento hidromecánico del material en condiciones subsaturadas (Villar 1995a).

La primera cuestión se abordó mediante ensayos que consisten básicamente en someter bloques cilíndricos de arcilla compactada, confinados en celdas herméticas e indeformables, a calentamiento y/o hidratación simultáneos y por frentes opuestos. Las dimensiones de los bloques de arcilla en estos ensayos están entre los 8 y 14 cm de altura y entre los 3 y 15 cm de diámetro. La Figura 7 muestra los principales componentes de un ensayo termo-hidráulico, con la celda en la parte central.

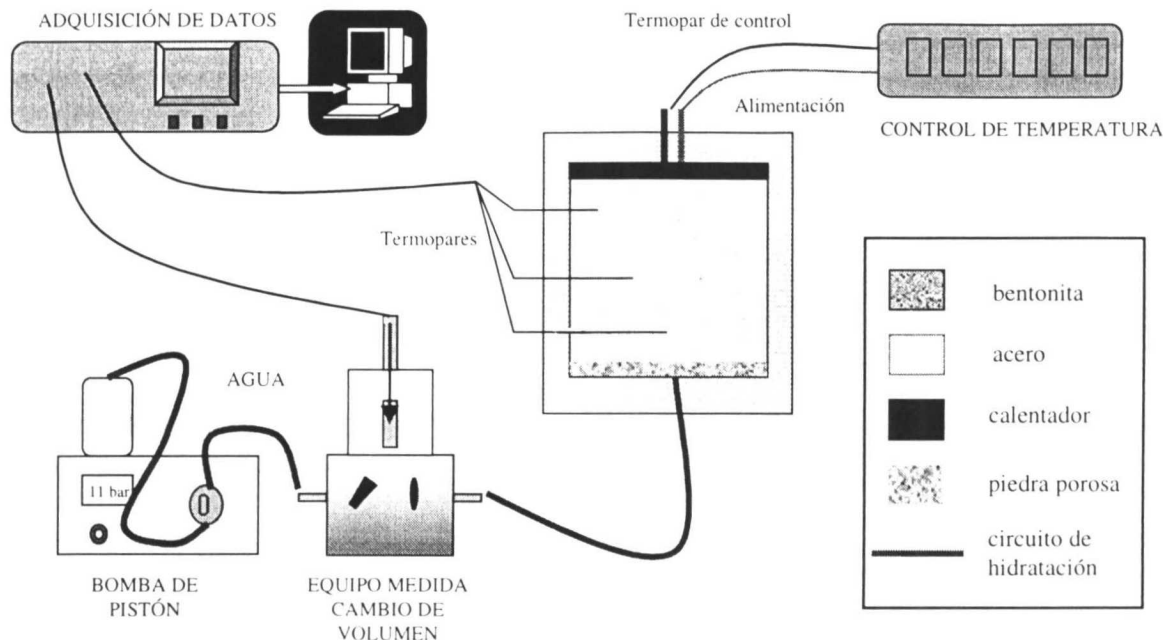


Figura 7: Esquema del montaje para la realización de un ensayo termo-hidráulico en laboratorio

Las principales conclusiones de estos trabajos, que se prolongan hasta la actualidad, se pueden resumir en los puntos siguientes (Villar et al. 1997):

- Las temperaturas registradas en el seno de la arcilla sometida a calentamiento e hidratación en celdas termohidráulicas, son función de la geometría y potencia del calentador, y para las mismas condiciones de contorno, son función de la humedad de la arcilla, puesto que un aumento de humedad produce un aumento de conductividad térmica.
- La velocidad de entrada de agua, para una presión de inyección y una densidad de la arcilla constantes, es función en cada momento de la humedad de la arcilla, es decir, de la succión, y no se ha podido identificar en el proceso la contribución del gradiente térmico, incluso aunque éste no exista (Figura 8).

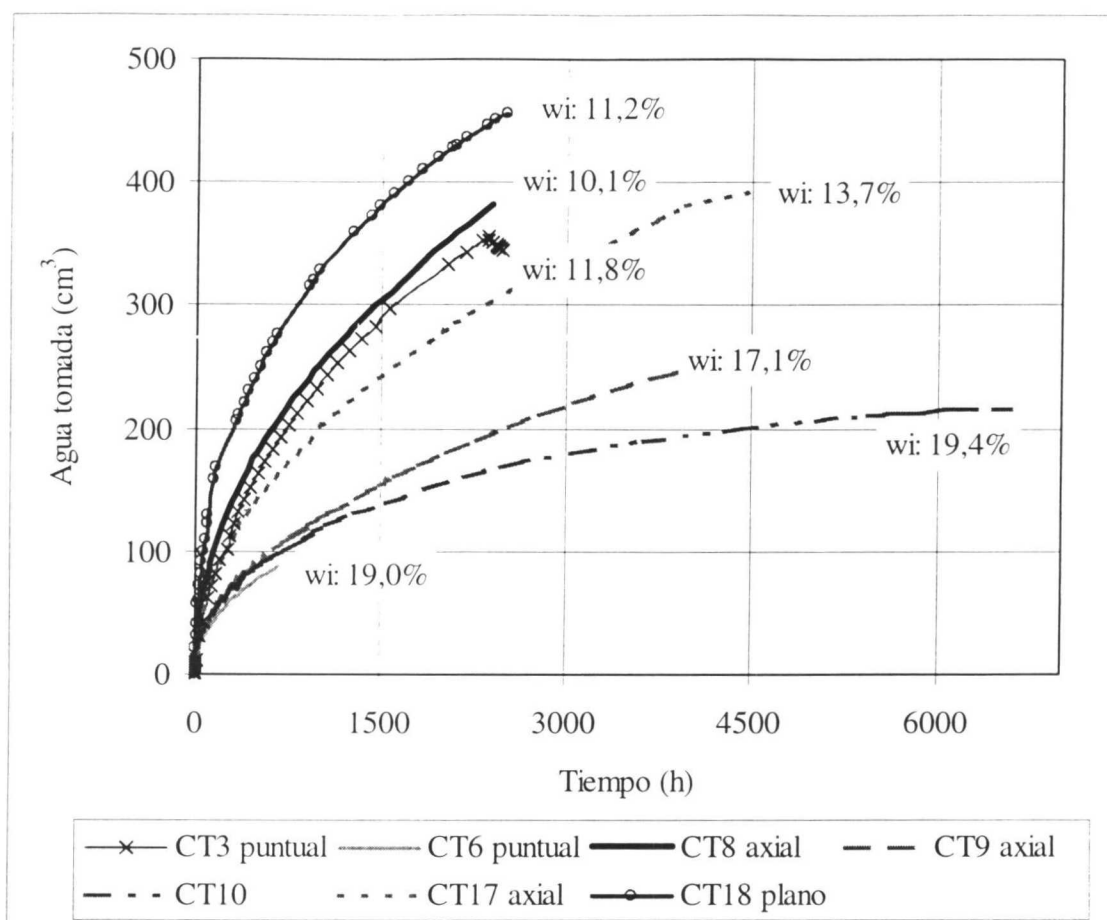


Figura 8: Velocidad de hidratación en las distintos ensayos en celda termohidráulica, con indicación de la humedad inicial (wi) y del tipo de calentador (puntual, axial, plano) (Villar et al. 1997)

- En los ensayos en los que sólo se hidrata, a medida que el frente progresa se produce un aumento de la humedad de la arcilla y una disminución de densidad seca debida a su hinchamiento. Esto lleva consigo un aumento de densidad en las zonas más alejadas de la superficie de hidratación como consecuencia de la compresión ejercida por la arcilla que se está expandiendo, ya que todo el proceso se realiza a volumen constante. Cuando además de hidratar la arcilla, ésta se calienta por el frente opuesto, la distribución de humedades se ve afectada por el gradiente térmico en un primer momento, debido a la desecación que se produce cerca del calentador, pero al aproximarse a saturación, el perfil de humedades se homogeneiza, así como el de densidades. Al calentar, el aumento de densidad de las zonas alejadas del frente de hidratación se ve acentuado, ya que contribuye a él la pérdida de humedad causada por la temperatura.

- A medida que va progresando la hidratación y se va alcanzando la saturación, se produce el sellado de los bloques de bentonita, incluso aunque éstos estén siendo calentados.
- Se han distinguido tres mecanismos implicados en el transporte de solutos, que actúan conjuntamente:
 - Advección: con el agua de hidratación, que produce la disolución de sales que son arrastradas en forma iónica hacia zonas más alejadas. Este mecanismo es particularmente intenso en el caso de los cloruros, que son rápidamente disueltos y transportados. El transporte por advección funciona independientemente de que exista gradiente térmico o no, aunque en el primer caso se acentúa, probablemente por el aumento de succión, y por lo tanto de afección por el agua, en las zonas calentadas y desecadas.
 - Advección-convección: en experiencias no excesivamente cortas en las que se ha producido calentamiento, e independientemente de que se produzca hidratación o no, se observa una concentración de sales en las proximidades del calentador que se atribuye a un proceso de advección-convección. El alcance espacial de este mecanismo es muy limitado y parece afectar con mayor intensidad a los sulfatos.
 - Difusión: se trata de un mecanismo lento que no comienza a ser perceptible hasta que no se ha alcanzado una saturación alta y se ha establecido un gradiente importante de concentraciones por medio de otros mecanismos. Resulta difícil de identificar porque queda enmascarado por los otros y requiere tiempos largos de experimentación. Se observa con claridad en las experiencias en celdas pequeñas de larga duración. Este proceso da lugar a una homogeneización de la concentración de sales solubles en el conjunto de la arcilla, puesto que actúa en sentido contrario a los otros dos mecanismos.
- Los frentes salinos creados provocan corrosión en los elementos metálicos del sistema, llegando a formarse óxidos de hierro y sales de cobre.
- El complejo de cambio se ve afectado por el establecimiento de un gradiente térmico. Es particularmente clara la disminución de sodio y potasio hacia las zonas calientes, siguiendo el perfil de las isotermas, lo que se produce incluso aunque no

haya hidratación. El magnesio intercambiable también sufre una redistribución condicionada por el gradiente térmico, aumentando su contenido hacia las zonas más calientes. Este último proceso sólo se observó en presencia de un frente de hidratación.

- La disminución de superficie específica externa hacia las zonas calientes con menor humedad puede atribuirse a una agregación de partículas de montmorillonita. Esto se correlaciona bien con la disminución del porcentaje de poros pequeños observada hacia las zonas calientes. Al agregarse la montmorillonita, aumentando con ello su tamaño de partícula, disminuye el porcentaje de poros pequeños.
- No se observaron concentraciones importantes y/o preferentes de sílice libre en ningún experimento, por lo que se supone que no se han producido cementaciones silíceas.
- La presión de hinchamiento de las muestras sometidas a calentamiento e hidratación está relacionada con la densidad seca y parece disminuir con respecto a la presión de hinchamiento de muestras de la misma densidad no sometidas a tratamiento, siendo este descenso mayor cuanto mayor es la temperatura a que ha estado sometida la arcilla y el tiempo de calentamiento. Sin embargo, en otra serie de ensayos realizados en celdas más pequeñas (diámetro 5,0 cm y altura 2,5 cm), se ha observado cierto aumento de la capacidad de hinchamiento tras tratamiento termohidráulico con agua granítica, lo que se ha atribuido a la disolución de agentes cementantes (Cuevas et al. 1999). Por tanto, el aspecto de la modificación de la capacidad de hinchamiento por tratamiento termo-hidráulico permanece sin evaluar.
- La conductividad hidráulica de las muestras sometidas a calentamiento e hidratación está relacionada con la densidad seca y sufre un ligero aumento con respecto a la conductividad hidráulica de muestras de la misma densidad no sometidas a tratamiento. Esto mismo se ha observado en los ensayos en celdas pequeñas mencionados en el punto anterior, especialmente si el tratamiento se produce con agua salina (Cuevas et al. 1999).

Por otra parte, el estudio del material en estado subsaturado se centró en la determinación de la relación succión/humedad a volumen libre para la arcilla con diferentes humedades y densidades y en la realización de ensayos edométricos con succión controlada. Los

ensayos edométricos siguieron dos tipos de trayectoria: 1) secado/hidratación bajo carga constante, seguidos de carga/descarga bajo la última succión alcanzada, 2) hidratación/secado bajo carga vertical constante, seguidos de carga/descarga bajo la última succión alcanzada. La máxima presión vertical aplicada en estos ensayos fue de 5 MPa, y la máxima succión fue de 140 MPa, lo que supone que la humedad de la arcilla en estos ensayos no fue nunca inferior a la higroscópica. Los resultados obtenidos muestran la rigidificación de la bentonita por efecto de la succión y la repercusión de la carga vertical aplicada durante la hidratación de la muestra sobre la reversibilidad de la deformación inducida (Villar 1995b, Villar & Martín 1996).

Así mismo se prosiguió la caracterización de la arcilla, abordando nuevos aspectos como la determinación de la distribución porosimétrica y del calor específico en función de la temperatura, y nuevas determinaciones de peso específico, capacidad de cambio catiónico y cationes intercambiables, conductividad térmica, etc. Otros aspectos abordados por primera vez fueron la extracción y análisis del agua intersticial y el análisis bacteriológico (Villar et al. 1997).

Por su parte, CSIC-Zaidín realizó en el período 1992-1995 un estudio de la alterabilidad hidrotermal de las bentonitas de Almería que se resume en Linares et al. 1996.

El Proyecto FEBEX

En planes de I+D realizados hasta 1994, parte de los cuales han sido resumidos en las secciones previas, ENRESA estudió fuentes de aprovisionamiento de materiales a utilizar en la barrera arcillosa y su comportamiento térmico, hidráulico, mecánico y geoquímico. Así mismo, se realizaron estudios de caracterización integral de macizos graníticos. El siguiente paso para conocer la viabilidad del concepto de AGP y para progresar en la comprensión y evaluación del comportamiento del campo próximo ha sido la ejecución de un experimento a gran escala, el Proyecto FEBEX (ENRESA 1997).

El propósito del Proyecto FEBEX es el estudio de los componentes del campo próximo de un almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad en roca cristalina según el concepto español (Figura 6), en el que las cápsulas de residuo se depositan

horizontalmente en galerías, rodeadas por una barrera de arcilla constituida por bloques de bentonita compactada a alta densidad (ENRESA 1995). Específicamente se plantearon tres objetivos: 1) demostrar la factibilidad de manejo y construcción de un sistema de barreras de ingeniería; 2) estudiar los procesos termo-hidro-mecánicos (THM) en el campo próximo; y 3) estudiar los procesos termo-hidro-geoquímicos (THG) en el campo próximo.

El Proyecto FEBEX está coordinado por ENRESA –asistida por NAGRA (Suiza) en algunos aspectos–, y en su primera fase han participado en él las siguientes organizaciones: CIEMAT, AITEMIN, UPC, ULC, CSIC-Zaidín y UPM (España), ANDRA y G.3S (Francia), y GRS (Alemania). El Proyecto está cofinanciado por la Comisión Europea.

El Proyecto consta de tres partes principales: un ensayo *in situ* en condiciones naturales y a escala real (Grimsel, Suiza); un ensayo en maqueta a escala casi real (CIEMAT, Madrid); y un conjunto de ensayos de laboratorio para complementar la información de los dos ensayos a gran escala. Todas las actividades sirven de soporte a un amplio programa de trabajos de modelización (ENRESA 2000).

En los dos ensayos a gran escala el efecto térmico del residuo se simula mediante calentadores, pero la hidratación es natural en el ensayo *in situ* y controlada en la maqueta. Ambos ensayos están monitorizados, lo que permite obtener de manera continua la evolución de temperatura, presión total, humedad, presión de agua, desplazamientos y otros parámetros, en diferentes partes de la barrera y de la roca almacén, lo que se utiliza como contraste con las predicciones de los modelos THM y THG.

El ensayo *in situ* se realiza en una galería excavada en el granito del laboratorio subterráneo que NAGRA gestiona en Grimsel (Suiza). Los componentes básicos del ensayo son (Figura 9): la galería de 70,4 m de longitud y 2,3 m de diámetro; el sistema de calentamiento, constituido por dos calentadores colocados dentro de un tubo guía instalado concéntricamente con la galería y separados 1,0 m entre sí, con dimensiones y pesos análogos a los de las cápsulas reales; la barrera de arcilla, formada por bloques de bentonita compactada; la instrumentación; y el sistema de monitorización y control, para la adquisición de datos y supervisión y control del ensayo tanto de forma autónoma como a distancia desde Madrid.

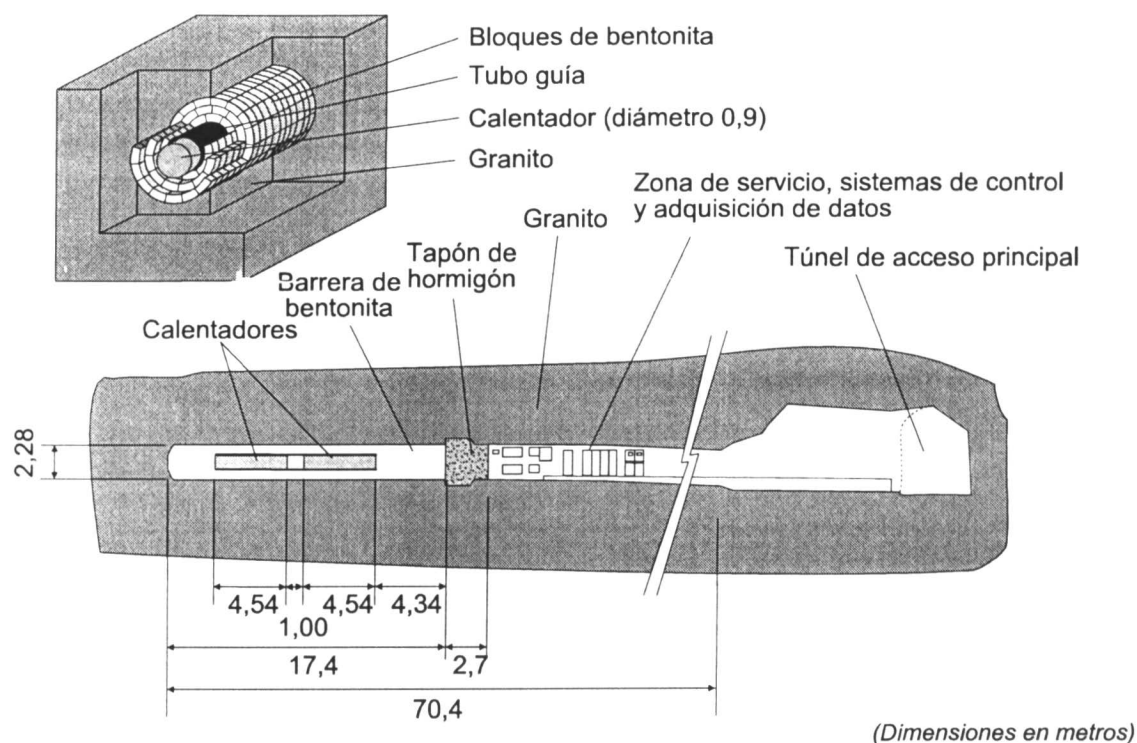


Figura 9: Esquema general del ensayo *in situ* (ENRESA 2000)

El ensayo en maqueta, que se realiza en las instalaciones de CIEMAT (Madrid), consta de cinco componentes básicos (Figura 10): la estructura de confinamiento con su sistema de hidratación, que es un cuerpo cilíndrico de acero con una longitud de 6,0 m y un diámetro interior de 1,6 m, con boquillas a través de las que se suministra agua granítica a presión; el sistema de calentamiento, constituido por dos calentadores cilíndricos concéntricos con la estructura de confinamiento; la barrera de arcilla, formada por bloques de bentonita compactada; la instrumentación; y los sistemas de adquisición de datos y de control de los calentadores. La Figura 11 muestra una imagen del proceso de montaje de los bloques de bentonita en el ensayo en maqueta.

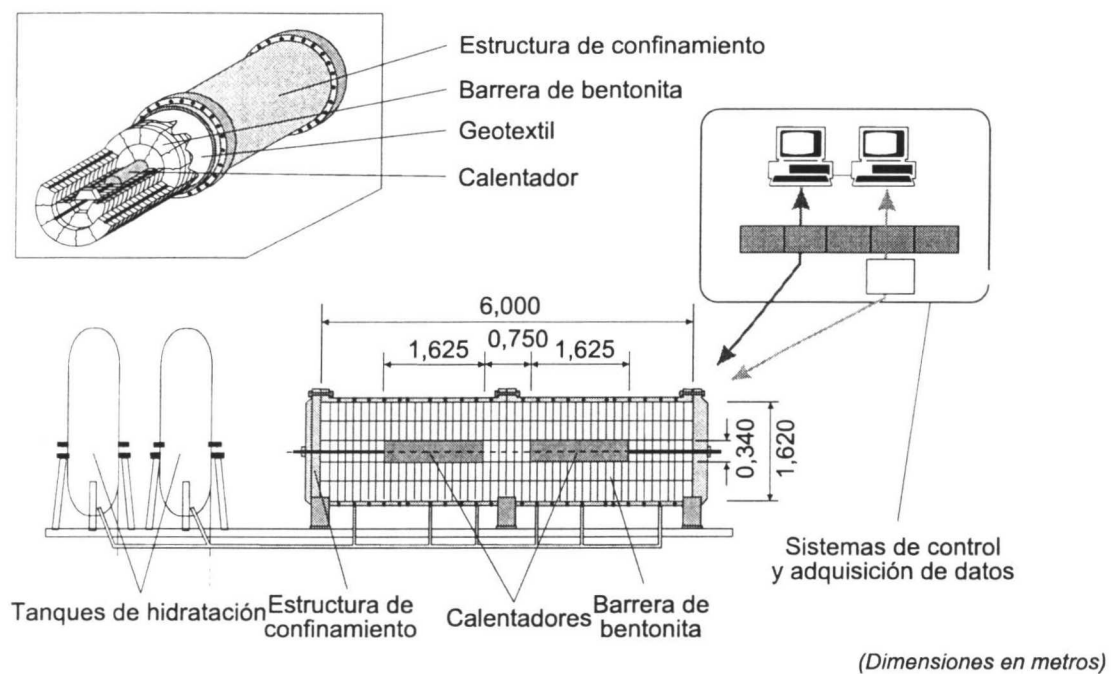


Figura 10: Esquema general del ensayo en maqueta (ENRESA 2000)

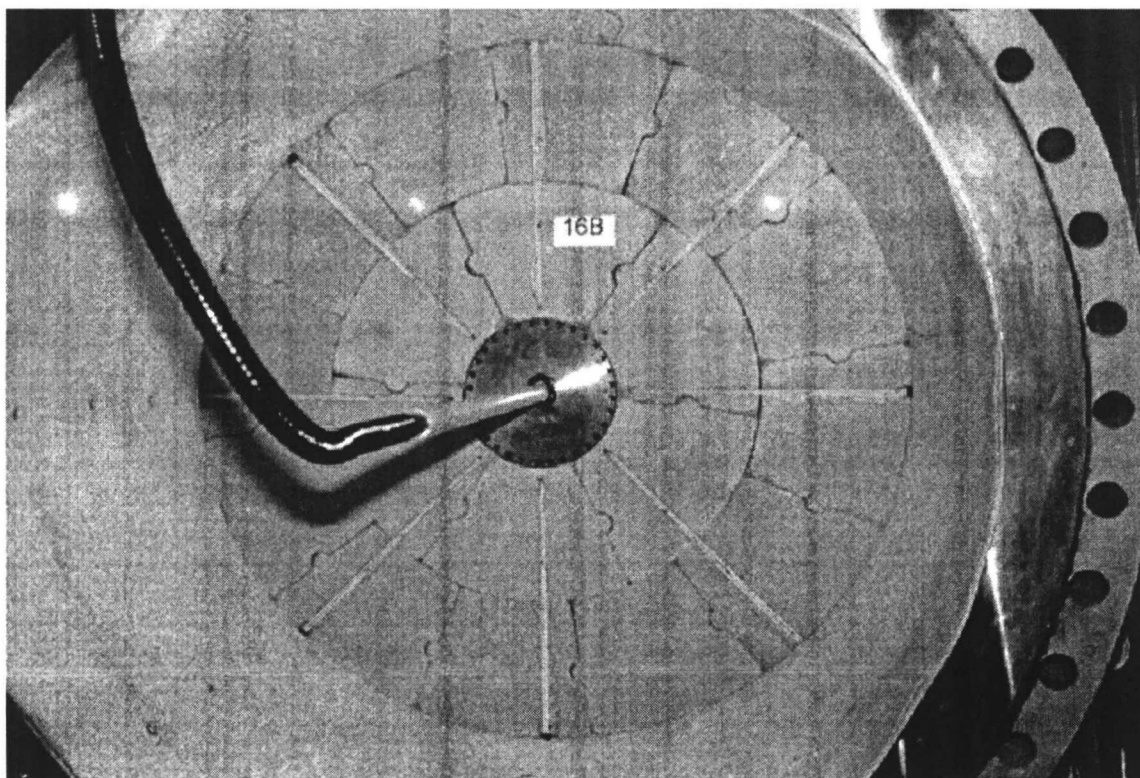


Figura 11: Aspecto de una sección de bloques de bentonita con el calentador insertado en el ensayo en maqueta (Martín 1999)

Los estudios de laboratorio incluyen ensayos de caracterización y obtención de parámetros, ensayos termo-hidro-mecánicos (THM) y ensayos termo-hidro-geoquímicos (THG), cuyo objetivo es medir los cambios experimentados por la bentonita frente a acciones análogas a las que se desarrollan en la barrera de arcilla y su repercusión sobre el comportamiento posterior. Además, estos ensayos soportan las modelizaciones THM y THG, sirviendo para la comprobación de su capacidad predictiva. El trabajo que aquí se presenta es parte del grupo de ensayos de laboratorio realizados sobre la bentonita para el Proyecto FEBEX.

La arcilla utilizada en todos los experimentos del Proyecto, tanto los de gran escala como los de laboratorio –arcilla FEBEX–, proviene del yacimiento Cortijo de Archidona (Almería), y sus características básicas se detallan en la sección “MATERIAL”.

Tanto para el ensayo *in situ* como para el ensayo en maqueta se fabricaron con la bentonita varios tipos de bloque en forma de sector de corona circular, con ciertas variaciones dimensionales entre los distintos tipos, y pesos comprendidos entre los 20 y los 25 kg. En el caso de los bloques del ensayo en maqueta, la distancia aproximada entre el radio externo (R) y el interno (r) es de 31 cm, y el espesor de 12,5 cm (Figura 12). Los bloques se obtuvieron por compactación uniaxial de la arcilla FEBEX con su humedad higroscópica a presiones de entre 40 y 50 MPa.

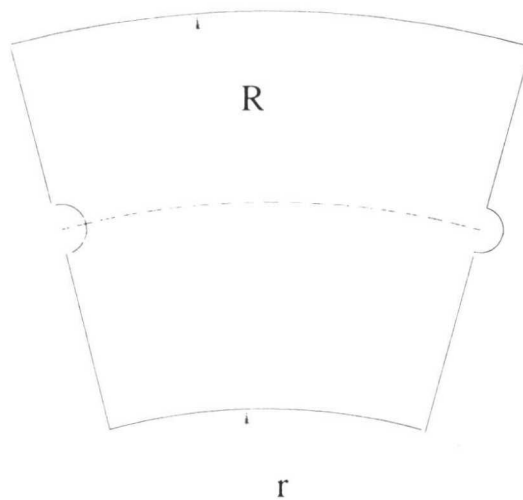


Figura 12: Vista en planta de un bloque de los fabricados para el ensayo en maqueta

A pesar de que el FEBEX es básicamente un proyecto de I+D, ENRESA decidió aplicarle un programa de garantía de calidad, cuyo objetivo básico es la reducción de la probabilidad de errores, por las siguientes razones (ENRESA 1997):

- Los resultados de FEBEX se utilizarán para el diseño y evaluación del comportamiento del Proyecto de Almacenamiento Geológico Profundo de ENRESA.
- Dado que sería imposible reparar durante la etapa operacional algunos de los componentes fundamentales de los ensayos a gran escala, su fabricación y montaje se debía someter a control de calidad para reducir la probabilidad de fallos.
- La participación de numerosas organizaciones requiere el establecimiento de una reglamentación de actividades y relaciones entre los grupos de trabajo que facilite la dirección del Proyecto
- El coste financiero de FEBEX ha sido elevado.

Las repercusiones del establecimiento de un Programa de Garantía de Calidad sobre el trabajo reflejado en este estudio se detallan en el capítulo “METODOLOGÍA”.

COMPORTAMIENTO TERMO-HIDRO- MECÁNICO DE ARCILLAS EXPANSIVAS

COMPORTAMIENTO TERMO-HIDRO-MECÁNICO DE ARCILLAS EXPANSIVAS

En geotecnia, se denomina suelo expansivo a aquél constituido fundamentalmente por materiales arcillosos con estructura laminar potencialmente inestable, tales como la montmorillonita, vermiculita, clorita o sus interestratificados. En general son suelos con límites líquidos elevados y alta plasticidad. Se caracterizan por su gran deformabilidad al hidratarse, ya que las partículas incorporan el agua en su interlámina, aumentando su volumen. Los cambios de volumen en estos suelos se producen tanto como consecuencia de las variaciones en sus estados tensionales externos como por cambios internos de su microestructura debidos a los cambios de humedad.

Entre los suelos expansivos se encuentran las bentonitas, que constituyen el objeto de este estudio. El término bentonita se utiliza para designar a una arcilla que procede de la alteración de vidrios volcánicos. Como todas las arcillas, es un material de grano fino que se hace plástico al ser mezclado con agua, y está constituida por diferentes minerales en proporciones variables. La bentonita está constituida fundamentalmente por minerales del grupo de las esmectitas (en concreto por montmorillonita), que le proporcionan sus extraordinarias propiedades expansivas, además de por diversas cantidades de cuarzo, feldespato, micas o anfíboles, entre otros.

Por este motivo, en la siguiente sección se describen la constitución y características de las esmectitas y sus propiedades. A continuación, se analizan los procesos que se espera tengan lugar en un almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad, y su repercusión sobre la bentonita de la barrera. Con ello se pretende justificar el tipo de caracterización a que el material se ha sometido en el trabajo que aquí se presenta, que está condicionado por el uso muy específico, en cuanto a preparación y a condiciones de trabajo, que la bentonita tiene como material de barrera. Finalmente, en la última sección de este capítulo, se realiza una revisión de las técnicas experimentales utilizadas habitualmente para el estudio en laboratorio del comportamiento de los materiales expansivos y de los suelos no saturados.

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESMECTITAS

Descripción

Las esmectitas son minerales arcillosos del grupo de los filosilicatos constituidos por unidades estructurales compuestas por dos capas de poliedros de coordinación tetraédricos (T) entre las que se encuentra una capa central octaédrica (O), por lo que se denominan silicatos 2:1. En el interior de cada tetraedro hay un átomo de silicio que se coordina con 4 oxígenos o hidroxilos colocados en los extremos. Por su parte, los octaedros tienen en su interior átomos de aluminio, hierro (II y III) o magnesio en coordinación con 6 oxígenos o hidroxilos distribuidos en dos superficies paralelas entre sí (Figura 13). Todos los vértices de los tetraedros apuntan en la misma dirección y hacia el centro de la unidad, mientras que las bases de cada una de las capas de tetraedros constituyen los planos exteriores de la unidad. Las capas tetraédricas y octaédricas están combinadas de tal manera que los vértices de los tetraedros de cada capa de sílice y una de las superficies de la capa octaédrica están en un mismo plano. Los átomos comunes a la capa tetraédrica y octaédrica son oxígenos en lugar de hidroxilos.

Cuando el catión de la capa octaédrica es trivalente, como por ejemplo, el aluminio, una de cada tres posiciones catiónicas está desocupada, lo que da lugar a que la capa octaédrica tenga la estructura de la gibbsita, $\text{Al}(\text{OH})_3$, y a que la esmectita se denomine dioctaédrica. En este grupo se encuadran la montmorillonita, la beidellita y la nontronita. En las esmectitas trioctaédricas, el catión de la capa octaédrica es divalente, con lo que todas las posiciones catiónicas están ocupadas, originándose una capa octaédrica con la geometría de la brucita, $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Este es el caso de las saponitas y hectoritas (Hurlbut & Klein 1982).

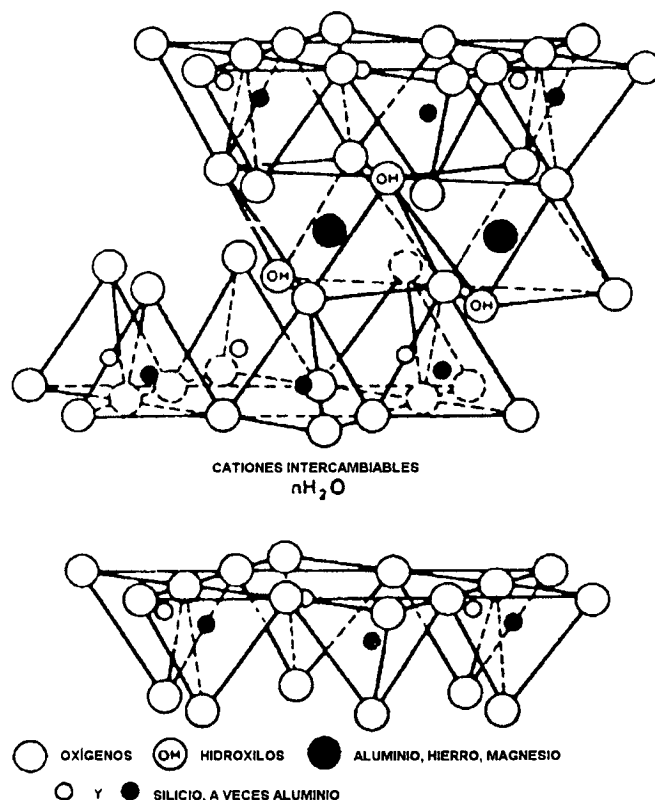


Figura 13: Representación esquemática de la estructura de la montmorillonita (Grim 1968)

Las unidades T-O-T se denominan láminas, y son continuas en las direcciones a y b , es decir, su extensión es indefinida, mientras que se apilan una sobre otra en la dirección c . Al apilarse las unidades T-O-T, los planos de oxígeno de cada unidad quedan adyacentes a los planos de oxígeno de las unidades vecinas. En función de las sustituciones isomórficas que se produzcan en la estructura, las láminas presentarán una carga negativa de mayor o menor magnitud. Por ello, las posiciones entre planos de oxígeno adyacentes suelen estar ocupadas por cationes de intercambio. Esto hace que entre estas unidades pueda entrar agua para solvatación de los cationes y otras moléculas polares, provocando la expansión de la red cristalina en la dirección del eje c . Por eso, la dimensión en el eje c de la esmectita no es fija, sino que varía en función del tamaño de la molécula que se encuentre entre las unidades y de su estado de hidratación. Cuando no hay moléculas entre las láminas la dimensión del eje c está entre 9 y 10 Å (0,0009-0,001 μm), pudiendo aumentar cuando existen moléculas polares o cationes hidratados hasta 16 Å (Grim 1968). El

número de cationes necesarios para alcanzar el equilibrio eléctrico es la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la arcilla, que se puede medir experimentalmente.

Los apilamientos de láminas de arcilla forman partículas primarias cuyo espesor está comprendido entre 0,0015 y 0,0150 μm , pudiendo variar en esmectitas según el estado de hidratación, llegando hasta 0,0600 μm (Ben Rhaiem et al. 1986). Las láminas apiladas están separadas entre sí por capas de agua. Cuando estas capas están organizadas las partículas primarias se denominan cuasi-cristales. Éstos a su vez se agrupan dando lugar a agregados.

Como hemos visto, la superficie de las partículas primarias en los silicatos 2:1 es una interfase con carga eléctrica negativa. Puesto que el agua del suelo contiene solutos disueltos, entre los que se encuentran diferentes cationes, la interacción entre la superficie cargada de la partícula arcillosa y los cationes del agua del suelo da lugar a una doble capa eléctrica (electric double layer, EDL), es decir, al ordenamiento de las cargas negativas y positivas en torno a la interfase eléctrica. Pero puesto que los iones de una disolución tienen movilidad, tras la primera capa de cargas positivas (la que constituye la EDL), cationes y aniones aparecen mezclados, predominando los primeros en las proximidades de la superficie de la partícula, e igualándose las cargas al alejarnos de la partícula. A la zona en la que el potencial eléctrico varía en función de la distancia a la partícula se la denomina doble capa difusa (diffuse double layer, DDL) o, más correctamente, capa difusa de iones (diffuse ion-layer, DL). La Figura 14 es una representación esquemática del desarrollo de la EDL y la DL. Cuando dos partículas están próximas, sus DL interaccionan, produciéndose una repulsión entre ellas cuya magnitud está condicionada en parte por la química del agua de los poros. El espesor de la DL depende de varios factores, entre los que se encuentran la concentración de sales, la valencia de los cationes de cambio y la temperatura, que hacen disminuir su espesor; y, por otra parte, el tamaño del ion hidratado y la constante dieléctrica y el pH de la disolución, que lo hacen aumentar. Estos factores influyen a su vez en la capacidad de hinchamiento de la arcilla, puesto que éste aumenta con el espesor de la DL.

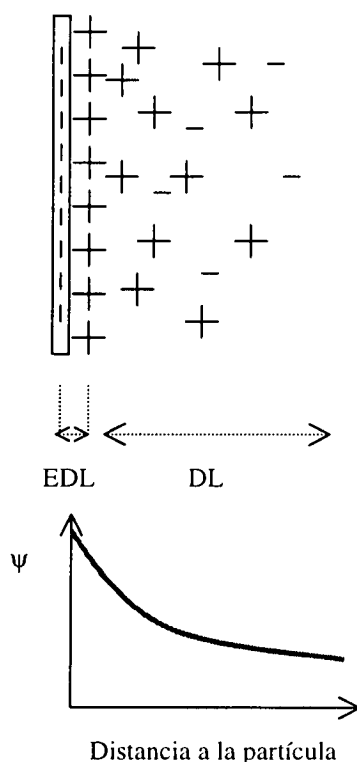


Figura 14: Representación esquemática de una partícula de arcilla cargada negativamente interaccionando con los iones en el agua de los poros. EDL: doble capa eléctrica, DL: capa difusa de iones, ψ : potencial eléctrico (Yong et al. 1992)

La organización de láminas, partículas y agregados en un material arcilloso da lugar a diferentes tipos de porosidad, que es preciso conocer para comprender los mecanismos y procesos que tienen lugar a diferentes niveles estructurales dentro del material, ya que además, cada porosidad lleva asociado un tipo de agua con propiedades diferentes (Stepkowska 1990). Se pueden distinguir los siguientes tipos de porosidad, que se esquematizan en la Figura 15:

- Porosidad interlámina o interfiliar, a la que sólo acceden las moléculas polares, y cuyos espaciados están comprendidos entre 2 y 10 Å (aunque para las esmectitas sódicas hidratadas pueden ser mayores). Constituye el agua de solvatación de los cationes. El agua que accede a esta porosidad está influenciada por el campo eléctrico y está fuertemente ligada, por lo que sus propiedades son muy diferentes a las del agua libre, presentando menor movilidad. Algunos autores señalan que esta agua se puede mover libremente sobre la superficie de la lámina pero no perpendicularmente a ella (Stepkowska 1990).

- Porosidad intra-agregados, en el interior de las partículas primarias, entre apilamientos de láminas adyacentes. Se denomina también porosidad lenticular o microporosidad, y comprende poros de diámetros inferiores a $0,0020\mu\text{m}$, aunque en estados de saturación elevados pueden llegar hasta $0,0035\mu\text{m}$. En ellos se desarrollan las capas difusas. El agua que forma parte de las capas difusas también está adsorbida, y no puede separarse de la partícula arcillosa por acciones hidrodinámicas hasta que la distancia a la partícula no es lo suficientemente grande.
- Porosidad inter-agregados (mayor de $0,002\mu\text{m}$), que a su vez se puede clasificar en macroporosidad y mesoporosidad, según que su diámetro sea superior o inferior a $0,05\mu\text{m}$. En estos poros el agua está retenida por fuerzas capilares o gravitacionales, y se denomina externa, por oposición al agua contenida en el resto de la porosidad, que se denomina interna. La proporción de agua externa en las esmectitas disminuye al aumentar la densidad del material y al disminuir la humedad, pudiendo llegar a ser inferior al 20 % para esmectitas cálcicas compactadas a densidad seca de $1,60\text{ g/cm}^3$ (Pusch 1994). Sin embargo, para una pasta de montmorillonita cálcica sin confinamiento sometida a una succión muy baja ($0,032\text{ bar}$), Ben Rhaiem et al. (1986) dan un porcentaje de agua externa del 85 %.

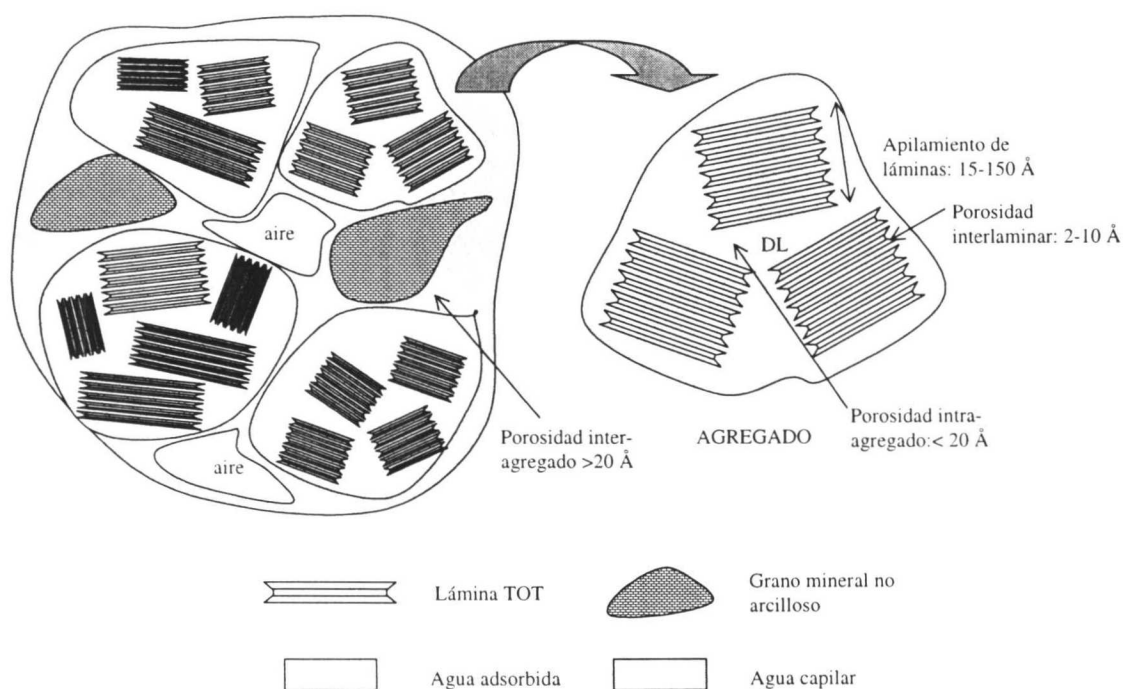


Figura 15: Esquema de la organización de un material arcilloso: tipos de porosidad y de agua

La retención del agua en el suelo se produce según diferentes mecanismos, siendo predominante uno u otro según la humedad del suelo (es decir, la actividad del agua): para humedades bajas predomina el mecanismo de la adsorción, que es función de la superficie específica, y que tiene lugar en los microporos; y para humedades más altas la condensación capilar, que es función de la forma y disposición de las partículas y tiene lugar en los mesoporos y macroporos (Everett & Haynes 1973). La adsorción crea pilares alrededor de los cationes intercambiables y una película de agua en las superficies externas de partículas o agregados, procesos ambos que inducen el aumento del espaciado entre las láminas y la distancia entre partículas, es decir, el hinchamiento. Estas fuerzas de adsorción que inducen el hinchamiento se ven equilibradas por las fuerzas de condensación capilar (Prost et al. 1998).

El agua contenida en las diferentes porosidades se denomina en conjunto agua de hidratación. La deshidratación del mineral es un proceso en el que están implicadas reacciones que tienen condicionantes termodinámicos (la temperatura) y cinéticos (el tiempo) (Cuadros et al. 1994). Así por ejemplo, el agua de hidratación se pierde con el calentamiento a 110 °C si éste se prolonga durante 24 horas. Sin embargo, en los estudios termogravimétricos, en los que el calentamiento de la arcilla tiene lugar a gran velocidad (del orden de 10 °C/min), se acepta generalmente que el agua de hidratación sale de la arcilla al calentar a temperaturas por debajo de aproximadamente 300 °C, perdiéndose la mayor parte por debajo de 200 °C. Además, los estudios termogravimétricos en esmectitas registran una pérdida más o menos continua de masa para temperaturas mayores, solapándose las temperaturas de pérdida de agua de hidratación con las de pérdida de agua estructural, es decir, de deshidroxilación (pérdida de grupos OH), que tiene lugar entre 500 y 700 °C.

Propiedades hidro-mecánicas

La constitución de las esmectitas, descrita en la sección anterior, es la responsable del peculiar comportamiento hidro-mecánico de los suelos que las contienen, cuya característica más sobresaliente es su capacidad para cambiar de volumen. Este comportamiento es común a otros minerales arcillosos (vermiculitas, cloritas) que tienen

organizaciones estructurales semejantes. Se acepta generalmente que varios mecanismos intervienen en la expansión de un suelo, pudiendo clasificarse en tres grupos principales interrelacionados (Mitchell 1976):

- Atracción del agua por las partículas de arcilla. La carga negativa de la superficie de las partículas de arcilla se compensa con cationes y con moléculas dipolares como las del agua. A su vez, la atracción y fijación de las moléculas de agua se realiza a través de dos mecanismos: 1) el enlace de hidrógeno de las moléculas de agua a la superficie del mineral de arcilla y 2) la atracción dipolo-dipolo de las moléculas de agua entre sí, que da lugar a que más de una capa de moléculas de agua pueda ser adsorbida. Estas moléculas de agua tienen una orientación respecto a la partícula arcillosa que decrece con la distancia.
- Hidratación de cationes. A medida que se hidratan los cationes de cambio que se encuentran unidos a las superficies de las láminas, aumenta su radio iónico, dando lugar al aumento de volumen del suelo.
- Repulsión osmótica. Los gradientes de concentración desarrollados en las capas difusas de iones asociadas a las arcillas inducen un intercambio con el agua libre, que intenta pasar hacia el interior de la capa difusa de iones (DL), que actúa como una membrana semipermeable, provocando su aumento de volumen.

Además, las fuerzas de Van der Waals y la relajación elástica en suelos de mucha densidad pueden contribuir en menor grado a los fenómenos de expansión.

Los principales factores que afectan a la expansión de un suelo se pueden dividir en tres grupos (Pousada 1984). El primer grupo es el concerniente a las propiedades intrínsecas de las partículas y a las condiciones de la masa del suelo, e incluye por lo tanto el tipo de mineral arcilloso y su proporción, la densidad seca, la humedad, la orientación de las partículas y el tipo y cantidad de cationes adsorbidos (Pusch 1979). El segundo grupo se refiere a la composición y propiedades del agua de saturación. Finalmente, los factores externos, como el historial de tensiones del suelo, la temperatura y la disponibilidad de agua, también influyen en el hinchamiento.

El aumento de volumen de un suelo expansivo en contacto con agua es mayor cuanto mayor es su densidad seca, y menor cuanto mayor es la presión ejercida sobre él y su humedad inicial. Por otra parte, si un material expansivo se satura a volumen constante mientras se impide su deformación, las partículas ejercerán una presión sobre la estructura confinante que se denomina presión de hinchamiento, y que alcanza su valor de equilibrio cuando la muestra está completamente saturada. Esta presión de hinchamiento es mayor cuanto mayor es la densidad seca inicial del material. Así mismo, cualquier suelo saturado aumenta su volumen al disminuir la presión efectiva que actúa sobre él, en una medida que depende de la densidad seca inicial del suelo y de la magnitud de la variación de presión.

Por el contrario, el volumen de un suelo saturado disminuye si el agua es expulsada de los poros mediante el proceso conocido como consolidación (Atkinson & Bransby 1977). El movimiento del agua que sale desde los poros internos del suelo hacia el exterior está controlado por la ley de Darcy y provoca una disminución de volumen cuyo desarrollo depende de la interacción entre los esfuerzos total y efectivo, de la presión de poro, del flujo, del gradiente hidráulico y de la permeabilidad. En un suelo no saturado la aplicación de una carga produce un exceso de presión de aire y agua en los poros que también se disipa mediante la consolidación, volviendo finalmente a los valores anteriores a la carga (Fredlund & Rahardjo 1993).

Jiménez & Serratosa (1953) estudiaron la compresibilidad de una arcilla proveniente de la Serrata de Níjar (Almería) después de modificar su complejo de cambio, observando que la capacidad de hidratación del catión de cambio tiene influencia sobre la compresibilidad y la permeabilidad de la arcilla.

En general, la permeabilidad de un suelo está relacionada con el tamaño de sus poros, siendo menor cuanto menor es el tamaño medio de éstos. Debido al pequeño tamaño de partícula y de poro de los materiales arcillosos, su permeabilidad al agua (k) es muy baja, estando relacionada fundamentalmente con la humedad y la densidad seca del material.

La permeabilidad al agua de cualquier suelo aumenta con el contenido de humedad y disminuye con la densidad seca, mientras que la permeabilidad al gas (k_g) disminuye al aumentar la humedad y con la reducción de densidad seca. La permeabilidad al agua puede incrementarse varios órdenes de magnitud cuando el suelo pasa de estado seco a saturado,

y lo contrario sucede para la permeabilidad al gas. A medida que aumenta el grado de saturación va aumentando la presión de agua en los poros, hasta que el agua corta las interconexiones entre los poros ocupados por el aire y éste deja de estar en forma continua. En estas condiciones, la facilidad del aire para moverse bajo la acción del gradiente de presión disminuye bruscamente. De hecho, la permeabilidad relativa (k_r), que es la relación entre la permeabilidad al agua de un suelo a determinada humedad (k) y la permeabilidad del mismo suelo saturado (k_w), se relaciona de forma potencial con el grado de saturación. Sin embargo, la permeabilidad puede hacerse nula aun cuando el grado de saturación no lo sea, porque el agua que se mueve es la de los interagregados, que son los primeros en desaturarse. El grado de saturación para el cual la permeabilidad se hace nula se denomina grado de saturación residual. Por otra parte, en condiciones saturadas, es decir, cuando todos los poros están ocupados por agua, la conductividad hidráulica disminuye con la densidad seca de forma exponencial.

El aspecto más peculiar del comportamiento hidráulico de los suelos expansivos es la modificación de su permeabilidad intrínseca en función del grado de saturación. La permeabilidad intrínseca (k_i), es una propiedad que depende exclusivamente del medio, y no de las propiedades del fluido. El valor de la permeabilidad intrínseca puede obtenerse a partir de medidas de flujo de aire en suelo totalmente seco, o a partir de medidas de flujo de agua en suelo completamente saturado. Por su propia definición, el valor de la permeabilidad intrínseca de un mismo suelo para un determinado valor de porosidad debería ser siempre el mismo, independientemente del fluido con que se determine. Sin embargo, si se producen interacciones entre el fluido y el medio, como sucede entre los suelos expansivos y el agua, la permeabilidad intrínseca puede sufrir importantes variaciones en función del grado de saturación, debido a la reducción del espacio disponible para el flujo al hinchar las láminas de arcilla (Tindall & Kunkel 1999).

El tipo de fluido permeante también puede modificar los valores de conductividad hidráulica: un aumento de salinidad del fluido genera conductividades hidráulicas más elevadas, debido a la contracción osmótica de la doble capa y al consiguiente aumento del tamaño de poro, lo que facilita el paso del fluido (Jiménez & Justo 1972).

Otra característica fundamental de los suelos expansivos, ligada a las propiedades que se han expuesto, es su elevada succión, es decir, su gran avidez por el agua y su aptitud para retenerla. En los suelos subsaturados coexisten tres fases: sólida (los granos minerales), líquida (el agua intersticial) y gaseosa (el aire y el vapor de agua en los poros no saturados). Esto modifica, con respecto a los suelos saturados, la mayoría de los fenómenos físicos que se producen en el suelo. La magnitud de la succión de las esmectitas cuando están alejadas del estado saturado es tal, que no puede ser medida directamente por métodos convencionales como los tensiómetros, psicrómetros, etc. Esto hace de ellas materiales muy higroscópicos, con gran capacidad de absorber agua en fase vapor.

El término succión (s) hace referencia al estado de la energía libre del agua del suelo. La energía libre del agua de suelo se puede medir a través de la presión parcial de vapor del agua del suelo. La relación termodinámica entre ambas se expresa mediante la ecuación de Kelvin:

$$s = -10^{-6} \frac{R \times T}{V_w} \ln \left(\frac{HR}{100} \right)$$

donde R es la constante universal de los gases ($8,3143 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$), T la temperatura absoluta, V_w es el volumen molar del agua ($1,80 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$) y HR la humedad relativa en porcentaje. Esta última viene dada por la relación entre la presión parcial de vapor del agua de los poros y la presión de saturación de vapor de agua sobre una superficie plana de agua pura a la misma temperatura. La succión del suelo es nula cuando la humedad relativa del aire en sus poros es del 100 %, y aumenta al disminuir esta humedad relativa.

Según la Sociedad Internacional de Ciencia del Suelo (ISSC 1965) el potencial total es la cantidad de trabajo que debe realizarse por cantidad unitaria de peso de agua pura, para transportar, de forma reversible e isoterma, una cantidad infinitesimal de agua desde un recipiente con superficie plana de agua pura a una elevación específica a presión atmosférica hasta el agua del suelo. El potencial total resulta de la suma de los siguientes términos:

- Potencial capilar o matricial, que está asociado con los fenómenos de capilaridad que son consecuencia de la tensión superficial del agua.
- Potencial osmótico, que corresponde a la atracción osmótica ejercida por el agua del suelo, que contiene sales, sobre el agua pura. La humedad relativa del suelo decrece con el aumento de sales disueltas en el agua de los poros, lo que da lugar a la succión osmótica.
- Potencial gravitacional.
- Potencial debido a presiones externas de gas o agua.

Cuando las presiones gravitacionales y externas son despreciables, el potencial total es igual a la succión total, puesto que ésta es la suma de los potenciales capilar y osmótico.

En un suelo no saturado, debido a los meniscos de los capilares en que interaccionan aire y agua, la presión del agua de los poros se hace más pequeña que la presión del aire, que por lo general es igual a la atmosférica. La diferencia entre la presión del aire (u_a) y la del agua (u_w), da el valor de la succión capilar, y es una medida de la atracción ejercida por el suelo sobre el agua en suelos de grano grueso. La presencia de estos meniscos modifica la humedad relativa del suelo y, por tanto, su succión total, puesto que, como hemos visto, la succión capilar es un componente de la succión total (Fredlund & Rahardjo 1993). En los suelos de textura fina como las arcillas, los fenómenos en la interfase mineral-agua, es decir, la adsorción, contribuyen también a la atracción del agua por el suelo, especialmente para grados de saturación pequeños. Por lo tanto, en un suelo arcilloso no saturado, el agua está ligada a la fase sólida no sólo por procesos de capilaridad, sino también de adsorción, dando lugar a lo que algunos autores denominan succión matricial, aunque con frecuencia ambos términos –capilar y matricial– se consideran sinónimos.

La succión capilar en un poro capilar varía con el diámetro del poro en relación inversa. Si se supone que los poros son cilíndricos, la succión capilar (h , en m) y el diámetro de poro al que afecta (d , en μm) están relacionados por la ley de Jurin-Laplace:

$$d = \frac{4 \times \sigma \times \cos \theta}{\rho_w \times g \times h} \times 10^6$$

donde σ es la tensión superficial del agua ($72,75 \cdot 10^{-3}$ N/m), θ el ángulo de contacto (0°), ρ_w la densidad del agua ($998,23$ kg/m³) y g la aceleración de la gravedad ($9,807$ m/s²).

De lo expuesto se deduce que la humedad de un suelo es función de su succión. La relación entre la humedad y la succión de un suelo puede expresarse mediante la representación gráfica del contenido volumétrico de agua de una misma muestra en función de la succión, que se conoce como la curva característica o curva de retención del suelo. Como veremos más adelante, uno de los usos posibles de la curva de retención es la derivación de la permeabilidad relativa a partir de ella.

Cuando el suelo expansivo se aproxima a la saturación puede presentar colapsos o desarrollar hinchamiento, dependiendo de su trayectoria tensional previa. Sin embargo, las succiones elevadas confieren a los suelos un aumento de la rigidez y del grado de sobreconsolidación (Alonso et al. 1987), y en suelos arcillosos, pueden producir deformaciones plásticas irreversibles (Richards 1984). Cuando el suelo es expansivo, los procesos cíclicos de humedecimiento y secado pueden provocar una expansión irreversiblemente en el primer humedecimiento, y a partir de él, el comportamiento del material se hace prácticamente elástico (Pousada 1984). Todas estas características son indicios de la importancia que, sobre el comportamiento de los suelos expansivos, tiene el historial de tensiones experimentado, incluyendo los cambios de humedad (succión).

En los últimos años, se han desarrollado modelos teóricos capaces de explicar este comportamiento mediante la consideración de la interacción entre una macroestructura controlada por fenómenos de capilaridad y una microestructura en la que tienen lugar fenómenos físico-químicos al nivel de partícula. En concreto, el modelo desarrollado por Gens & Alonso (1992) para arcillas expansivas no saturadas, es capaz de explicar que el hinchamiento sea función de la humedad inicial, de la densidad seca y de la carga aplicada; que la presión de hinchamiento dependa enormemente del índice de poros; que las deformaciones expansivas puedan ser irreversibles y estar condicionadas por la trayectoria; y que la presión de hinchamiento varíe con el método de ensayo.

Finalmente, hay que destacar que la capacidad de adsorber cationes y moléculas polares, incorporándolos en su complejo de cambio, es la propiedad de las esmectitas más valorada para su uso como barrera frente a la migración de radionucleidos, ya que su capacidad de

retenerlos en su estructura y minimizar su movimiento las convierte en una barrera geoquímica muy poderosa. A la sorción de radionucleidos disueltos en soluciones acuosas por parte de las arcillas contribuyen, además de los mecanismos de intercambio catiónico, la adsorción, precipitación, reacciones químicas, tamizado molecular y otros. Todos estos mecanismos se ven influidos por el tipo de mineral arcilloso, las características del radionucleido, la composición de la solución intersticial y las condiciones físico-químicas (Meyer & Howard 1983).

LA BENTONITA EN LAS CONDICIONES DEL ALMACENAMIENTO

El comportamiento de un almacenamiento está influido por los cambios que se producen en las propiedades mecánicas, físico-químicas y geoquímicas de las barreras de ingeniería y de la roca del entorno. Estos cambios se generan por los efectos combinados del calor producido por la desintegración del residuo, por el movimiento del agua, y por la composición geoquímica del campo próximo. Los criterios de diseño y los procedimientos de construcción de las barreras de ingeniería también influyen en el comportamiento de un almacenamiento.

El concepto español de almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad en formaciones geológicas estables a gran profundidad, AGP, prevé la excavación de galerías en cuyo centro se introducirán los contenedores cilíndricos de residuos rodeados del material de sellado (ENRESA 1995). La carga térmica de los contenedores será de 1200 W, lo que supone que, teniendo en cuenta su distribución espacial en el almacenamiento, la temperatura máxima en la bentonita más próxima a ellos será de 100 °C, diez años después de su emplazamiento. Los cálculos realizados prevén que la temperatura de la barrera sea homogénea y próxima a los 60 °C en un plazo de mil años (ENRESA 1997). Durante este tiempo se produce también la hidratación de la barrera, por lo que se denomina fase transitoria de resaturación del almacenamiento. Se espera que la vida del contenedor sea superior a los mil años, por lo que, cuando se produzca la rotura del contenedor, con la

consiguiente liberación de radionucleidos, la barrera estará ya completamente saturada, y podrá ejercer su papel de retención.

Durante la fase de construcción del almacenamiento, las galerías y todos los demás huecos se llenarán de aire a presión atmosférica. La bentonita se emplazará en el almacenamiento en forma de bloques compactados a alta densidad a partir de la arcilla granulada. Para estas densidades, la conductividad hidráulica de la bentonita es extraordinariamente baja, mientras que su capacidad de hinchamiento es muy elevada. Para facilitar la compactación y el almacenamiento de los bloques, éstos se fabrican con la arcilla con su humedad higroscópica, lo que supone que, para los intervalos de densidad que se están considerando, los bloques tienen inicialmente grados de saturación de entre el 50 y el 60 %. Por lo tanto, los poros más grandes contendrán aire, mientras que los poros intra-agregados y los espacios interlaminares estarán hidratados. Esto añade a la bentonita otra característica que condiciona de forma fundamental el comportamiento de la barrera: una succión muy alta. Esta elevada succión inicial impulsa y condiciona la saturación de los bloques, que tomarán el agua del medio geológico circundante por medio de los poros más grandes, que actúan como capilares a partir de los que se produce la distribución de agua hacia poros más pequeños, es decir, siguiendo un mecanismo de flujo con doble porosidad.

Por otra parte, la presión de agua en los poros saturados de la roca encajante será hidrostática, y su magnitud dependerá de la profundidad del almacenamiento, pudiendo ser del orden de 5 MPa. El gradiente de presión que se establece en el almacenamiento fuerza también la entrada de agua en la barrera, pero no tiene gran influencia hasta que la succión en la bentonita es pequeña, es decir, hasta el final del proceso. El movimiento de agua desde la roca circundante a la barrera arcillosa se puede ver algo facilitado por el aumento de permeabilidad en las paredes de la galería debido a las microfisuras originadas durante la excavación.

Sin embargo, la baja permeabilidad de la bentonita, todavía menor cuando no está saturada, provocará que el proceso de saturación sea muy lento. Los ensayos realizados en el laboratorio subterráneo de Stripa (Pusch & Börgesson 1985), así como el ensayo “in situ” en el laboratorio subterráneo de Grimsel para el Proyecto FEBEX (AITEMIN 1999), han mostrado que el transporte de agua desde la roca hacia la bentonita es muy uniforme, y

que el aumento de humedad en la bentonita se produce de forma espacialmente homogénea, sin que se vea afectado por la existencia de fracturas u otras zonas más activas hidráulicamente. Esto es debido a que la permeabilidad de la roca es alta respecto a la de la bentonita, por lo que el flujo de agua está determinado por las propiedades hidráulicas de la bentonita.

El aire contenido inicialmente en los poros de la bentonita se irá comprimiendo según avanza la hidratación, y los estudios realizados apuntan a que este aire se disolverá completamente en el agua que va entrando, lo que posibilitará la completa saturación de la barrera (Pusch & Börgesson 1985).

Durante la fase transitoria del almacenamiento, a medida que el material de la barrera arcillosa se va hidratando, se va produciendo su expansión. En las zonas más próximas a la superficie de la galería queda cierto hueco entre los bloques y la roca encajante, debido a la dificultad de conseguir un ajuste perfecto entre ambos. Este hueco, así como las juntas entre los diferentes bloques, puede absorber en parte el aumento de volumen de la bentonita, con lo que su densidad disminuirá en estas zonas respecto a la densidad de fabricación de los bloques. De hecho, se ha comprobado que la bentonita compactada a elevada densidad puede penetrar en las juntas y fracturas de la roca. Así mismo, los bloques quedan sellados tras la saturación. Sin embargo, esta disminución de densidad de la bentonita será sólo local, ya que la barrera en conjunto está confinada, lo que supone que, al producirse la hidratación, se desarrollarán presiones de hinchamiento y, por lo tanto, un aumento de las tensiones radiales en la barrera. Durante el estado transitorio estas tensiones provocan la compresión de las partes internas de la barrera a las que todavía no ha llegado el agua, que experimentarán un aumento de densidad. De esta forma se establecen un gradiente de densidad en el sistema, con densidades más bajas en las zonas donde ha llegado el agua y se ha producido la expansión de la bentonita, y más altas en las zonas más internas que son “empujadas” por sus vecinas. Estas modificaciones de la densidad van afectando a zonas más amplias a medida que progresa la hidratación.

La entrada del agua no sólo modifica el grado de saturación y la densidad de la bentonita, sino que produce también la disolución de ciertas especies minerales (cloruros, sulfatos, carbonatos), que son transportadas por este flujo advectivo, generando a su vez gradientes

de concentración geoquímica, diferentes para cada especie mineral en función de su movilidad (Villar et al. 1997).

En la parte interna de la barrera, el calor generado por el contenedor de residuos, provoca un aumento de temperatura que se transmite hacia fuera, por conducción, convección y radiación, generando un gradiente térmico. Esto produce un aumento de la presión de gas en las proximidades de la cápsula. La evaporación del agua, inducida por la elevada temperatura cerca del contenedor, ocasiona la desecación de la bentonita y su contracción, lo que contribuye a la disminución de la porosidad de los bloques en las zonas internas de la barrera. La expansión térmica de la bentonita no basta para compensar esta disminución de porosidad (UPC 1998). El vapor generado se difunde hacia regiones más externas y frías del sistema, donde se condensa. Esto puede dar lugar a aumentos locales del grado de saturación (UPC 1998). El agua condensada en las zonas más frías se puede mover de nuevo hacia el contenedor, por un proceso de flujo motivado por los gradientes de succión (Pusch & Börgesson 1985), pero esta vez cargada de especies minerales disueltas (de las que posee la arcilla originalmente y de las que van siendo aportadas por el flujo advectivo), que precipitan cerca del contenedor al evaporarse el agua. De esta forma se repite el proceso de evaporación/condensación, estableciéndose pequeñas “células de convección” cuyo efecto más evidente es el aumento de salinidad en las zonas más calientes (Villar et al. 1997). Este movimiento de vapor es por lo tanto un mecanismo importante en la transferencia de humedad y calor. Algunos autores señalan que el aumento de temperatura podría provocar la precipitación de la sílice en los poros de la bentonita –bien de la que se encuentra en la bentonita como fase lábil o de la liberada durante la degradación superficial de la esmectita–, produciéndose una cementación que disminuiría su capacidad de hinchamiento y de intercambio iónico y un aumento de la conductividad hidráulica (ENRESA 1997). Sin embargo, este aspecto no ha sido confirmado experimentalmente en ensayos en los que se ha sometido la bentonita compactada a condiciones similares a las del almacenamiento (Pusch 1985, Cuevas et al. 1999).

Finalmente, una vez alcanzada la saturación de la barrera, se produce la recuperación y una cierta homogeneización del índice de poros, cerrándose las juntas entre bloques y las fisuras que hubieran podido formarse durante la desecación. Mucho tiempo después del

cierre del almacenamiento, cuando la barrera esté ya completamente saturada y se haya producido la degradación de la cápsula de combustible, lo que sucederá en un plazo previsible de mil años, puede producirse una generación importante de gases en la parte interior de la barrera. Los procesos más importantes que darían lugar a la generación de gases son: la corrosión del acero de la cápsula, la degradación bacteriana de la materia orgánica, y la descomposición radiolítica del agua. En el caso de volúmenes muy grandes de gas generado, podrá dificultarse su evacuación por difusión en el seno del agua, que es el mecanismo dominante de transporte de gas en las etapas iniciales de saturación de la barrera, cuando sólo se cuenta con el aire inicialmente contenido en los poros de la bentonita. En este caso, podría producirse el escape del gas a través de “fracturas” instantáneas de la barrera, por un proceso que se denomina “break-through”, y que consiste básicamente en el transporte a través de caminos preferentes que se dilatan y propagan (Volckaert et al. 1995).

Por tanto, los aspectos térmicos, hidráulicos y mecánicos del sistema interaccionan de forma importante. Así, las variaciones en el grado de saturación afectan tanto al campo de temperaturas, por la dependencia de la conductividad térmica con la humedad, como a la distribución de tensiones, por los cambios de succión ligados a los cambios de humedad. Así mismo, la hidratación conduce a cambios importantes de volumen y rigidez en la bentonita. Por otra parte, las deformaciones inducidas térmicamente provocan variaciones de esfuerzos y cambios en la conductividad hidráulica. La difusión de vapor, favorecida por los gradientes térmicos, y la dependencia de la viscosidad del agua con la temperatura, con sus consecuencias sobre la conductividad hidráulica, también condicionan los fenómenos de transferencia de agua. Finalmente, los cambios de porosidad provocados por las variaciones de los esfuerzos, afectan a la conductividad hidráulica y, por lo tanto, al movimiento del agua. También pueden tener cierta importancia los efectos de las deformaciones en la temperatura, aunque la variación de la conductividad térmica con la porosidad no es grande.

TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA EL ESTUDIO DE MATERIALES EXPANSIVOS Y SUBSATURADOS

Hemos visto que el material que constituye la barrera es una bentonita compactada a alta densidad. Se trata por tanto de un material remoldeado muy expansivo. El emplazamiento de estos bloques en las condiciones del almacenamiento los someterá a gradientes térmicos e hidráulicos. El hecho de que los bloques no estén saturados inicialmente, unido a la baja permeabilidad de la bentonita, hace que se prevea un período transitorio relativamente largo en el que parte del material estará subsaturado.

Por tanto, la caracterización del material de barrera implica la utilización de técnicas experimentales adaptadas al estudio de suelos muy expansivos, tanto en estado saturado como no saturado. En las siguientes secciones se repasa el estado del arte en estas áreas.

Suelos expansivos

Aunque se han realizado muchos estudios en suelos con cierta expansibilidad, que abundan sobre todo en regiones de clima árido y semi-árido (Arnold 1984), el estudio geotécnico de materiales tan expansivos como las bentonitas apenas existe, debido fundamentalmente a que sus propiedades los hacen totalmente inadecuados para la obra civil. Estos materiales se han utilizado sobre todo en virtud de propiedades como la capacidad de adsorción (decoloración de aceites y grasas, clarificación y filtración de vinos, camas de gato, en la industria petroquímica y refinería de petróleo, excipiente farmacéutico) o las propiedades reológicas, especialmente la viscosidad, la capacidad de recubrimiento y las cualidades anti-estáticas (lodos de sondeos, arenas de fundición, antiapelmazantes, pinturas, papel, detergentes y suavizantes). Para estos usos no se requiere una caracterización geotécnica. Sin embargo, aplicaciones más recientes, como la de capa impermeable en vertederos de residuos urbanos, han fomentado el análisis de otras propiedades de las bentonitas, como por ejemplo su permeabilidad (Brandl 1992). A raíz de proponerse como materiales de barrera para almacenamientos de residuos radiactivos (Pusch 1979), se ha desarrollado el estudio de diferentes aspectos termo-hidro-mecánicos del comportamiento de las bentonitas compactadas a elevada densidad.

En general, los métodos de ensayo convencionales utilizados para la identificación y clasificación de suelos expansivos, pueden dividirse en tres categorías (Pousada 1984):

- **Técnicas indirectas.** Consisten en la medida de una o más propiedades intrínsecas del material de las que influyen en su expansibilidad. Entre estas propiedades están la composición del suelo (determinada por rayos X, análisis térmico diferencial, infrarrojos, etc.), sus características físico-químicas (capacidad de cambio de cationes), sus características físicas (contenido coloidal, superficie específica y microestructura), sus propiedades índice (límites de Atterberg y retracción lineal) y su clasificación geotécnica (que a su vez se realiza en base a las propiedades del suelo que ya se han comentado). De todas estas propiedades, las que guardan una mayor correlación con el grado de expansibilidad, son la mineralogía, la capacidad de cambio de cationes y los límites de Atterberg. Dado que la determinación de las dos primeras requiere técnicas complejas de las que no se dispone habitualmente en laboratorios de geotecnia, se ha puesto gran énfasis en el establecimiento de correlaciones entre el potencial de expansión y los diferentes límites de Atterberg, que son índices de determinación sencilla y rápida.
- **Técnicas directas.** Incluyen todos los métodos que determinan cuantitativamente las características de cambio de volumen de los suelos. Estas medidas se efectúan mediante ensayos de tipo edométrico. Básicamente se realizan tres tipos de ensayo de identificación en el equipo edométrico: 1) el ensayo de hinchamiento libre, en el que la muestra se inunda bajo una pequeña carga y se permite expandir hasta equilibrio, o, en la variante del hinchamiento bajo carga, la inundación se produce bajo una carga no necesariamente pequeña; 2) el ensayo de hinchamiento libre con posterior carga controlada, en el que, tras alcanzarse el hinchamiento máximo, se carga la muestra progresivamente, dejando que se estabilice la deformación para cada incremento de carga; y 3) el ensayo de presión de hinchamiento, en el que la muestra se inunda impidiendo su deformación mediante la aplicación de cargas.
- **Técnicas combinadas.** Correlacionan datos de técnicas directas e indirectas, como los límites de Atterberg, el contenido en arcilla, la humedad, el hinchamiento libre o la presión de hinchamiento. A partir de estas correlaciones, que en ocasiones toman

la forma de ecuaciones de predicción, los suelos se pueden clasificar en grupos de diferente magnitud del cambio de volumen, lo que permite realizar estimaciones semi-cuantitativas. Además, se han realizado clasificaciones de la expansibilidad del suelo en función de los valores obtenidos mediante técnicas indirectas. La Tabla I presenta una clasificación del potencial de hinchamiento libre y la Tabla II de los rangos de presión de hinchamiento del suelo inalterado en función ambas de otros parámetros obtenidos mediante determinaciones más sencillas.

Tabla I: Estimación del cambio de volumen potencial (hinchamiento libre) en arcillas (Holtz & Gibbs 1956)

Fracción <1 µm (%)	Índice de plasticidad	Límite de retracción	Expansión probable (% variación del volumen total)	Potencial de expansión
>28	>35	<11	>30	Muy alto
20-31	25-41	7-12	20-30	Alto
13-23	15-28	10-16	10-30	Medio
<15	<18	>15	<10	Bajo

Tabla II: Estimación de la presión de hinchamiento probable en función de datos obtenidos en campo y laboratorio (Chen 1988)

Fracción <75 µm (%)	Límite líquido (%)	Resistencia estándar a la penetración (golpes/300 mm)	Expansión probable (% variación del volumen total)	Presión de hinchamiento (MPa)	Grado de expansión
>35	>60	>30	>10	1	Muy alto
60-95	40-60	20-30	3-10	0,25-1	Alto
30-60	30-40	10-20	1-5	0,15-0,25	Medio
<30	<30	<10	<10	<0,05	Bajo

Además de las técnicas que se acaban de comentar, enfocadas exclusivamente a la identificación de la expansibilidad, el estudio de suelos expansivos en laboratorio incluye la cuantificación de la expansibilidad y la determinación de otras propiedades, como por ejemplo, la permeabilidad.

Cuantificación de la expansión

Los ensayos para cuantificar las características de expansión del suelo se pueden dividir en dos grandes grupos: los ensayos de inundación y los ensayos de succión controlada. Estos últimos se tratarán en la siguiente sección. Los ensayos con inundación de la muestra, es decir, aquéllos en los que permanece saturada, se pueden realizar en edómetros convencionales, en edómetros modificados para medida de las presiones laterales o en equipos triaxiales, según se describe a continuación.

Ensayos en edómetro convencional

Estos ensayos permiten cuantificar el porcentaje de hinchamiento y la presión de hinchamiento del suelo. La combinación de trayectorias de carga y descarga y de valores iniciales de presión y humedad da lugar a múltiples variedades del ensayo en edómetro. Entre los métodos de ensayo edométrico más útiles para su aplicación en ingeniería civil se encuentran los siguientes (Pousada 1984):

- Ensayo edométrico directo. La muestra, con su humedad natural, se somete a la carga correspondiente a la sobrecarga del terreno, se consolida y posteriormente se inunda de agua, permitiéndose su expansión hasta estabilización. A continuación se incrementa la carga por escalones y se observa la nueva consolidación. Finalmente se descarga.
- Ensayo edométrico múltiple. Consiste en la realización del ensayo edométrico directo sobre varias muestras sometidas a diferentes sobrecargas iniciales.
- Ensayo edométrico doble. Consiste en el ensayo simultáneo de dos muestras del mismo material, una que mantiene su humedad inicial durante todo el ensayo, y otra que es inicialmente inundada bajo una carga pequeña que permite su expansión. A continuación se cargan por escalones iguales ambas muestras. Aunque se ha utilizado ampliamente para el estudio de suelos colapsables, presenta el inconveniente de que no tiene en cuenta que la expansión depende de las trayectorias de tensión y humectación.

- Ensayo edométrico simple. La muestra se carga hasta la presión correspondiente a la sobrecarga de tierras, a continuación se descarga hasta una presión pequeña, se inunda, y finalmente, se vuelve a cargar progresivamente.
- Ensayo edométrico a volumen constante. Consiste en inundar la muestra impidiendo su deformación mediante la adición de cargas, hasta alcanzarse la presión de hinchamiento máxima, tras lo cual se procede a la descarga por decrementos.
- Ensayo edométrico con muestras dobles inundadas. Una de las muestras se ensaya según el procedimiento anterior, y la otra se inunda bajo una pequeña carga y, tras estabilizarse el hinchamiento, se carga incrementalmente hasta alcanzar la presión de hinchamiento obtenida con la otra muestra.

La elección de un tipo de ensayo u otro dependerá del objetivo con que se realice la determinación (simple identificación de la expansibilidad o cuantificación) y de las condiciones de carga a que el terreno vaya a estar sometido (por ejemplo, en explanadas donde las condiciones de carga son reducidas será preferible el hinchamiento libre, mientras que en usos en los que el material vaya a estar confinado, como en un almacenamiento, es necesario conocer su presión de hinchamiento). Krazynski (1973) señaló la importancia de que, en la medida del cambio de volumen, se consideren los diferentes factores relativos al estado del suelo y a las condiciones ambientales, así como la simulación de la carga a que será sometida la estructura.

Por otra parte, para la aplicación de estos métodos a materiales muy expansivos con presiones de hinchamiento muy altas, es necesario modificar los edómetros convencionales. Para ello, se puede aumentar la relación del brazo de palanca; utilizar células de carga en lugar del sistema mecánico de palancas para aplicar la tensión vertical; o disminuir la superficie de la muestra, con lo que se obtienen mayores presiones para una misma carga aplicada.

Ensayo edométrico con medida de presión lateral

Los ensayos edométricos descritos en la sección anterior, cuando se realizan en el edómetro convencional –cuya principal ventaja es la sencillez de uso–, presentan el

inconveniente de que no es posible controlar ni conocer el estado de tensiones en el suelo, ya que sólo se conoce de hecho la tensión vertical que se aplica. Por este motivo diversos investigadores han desarrollado métodos para la medida de la tensión lateral en celdas edométricas. Komornik & Zeitlen (1965) desarrollaron un dispositivo para medir la presión de hinchamiento lateral, que consiste en utilizar un anillo portamuestras delgado que dispone en su parte central de bandas extensiométricas. Posteriormente se han utilizado otros métodos para medir la presión lateral en el edómetro, la mayor parte basados en la utilización de anillos edométricos modificados. Entre éstos, Dineen (1997) destaca el anillo edométrico con una cámara rellena de agua y conectada a un transductor de presión; el anillo flotante conectado a una célula de carga; y el anillo partido conectado a LVDTs. Otra solución es utilizar una célula de carga colocada en la pared del edómetro.

Ensayo triaxial con control de expansión vertical y lateral

En algunos casos, los dispositivos de ensayo unidimensionales descritos no responden a la necesidad planteada por el problema a resolver. Diversos autores han desarrollado, desde los años 60, aparatos para medir de forma independiente la expansión vertical y horizontal, así como las presiones de hinchamiento, usando células triaxiales con diferentes modificaciones. Tisot & Aboushook (1983) estudiaron las características de hinchamiento de una bentonita utilizando diferentes técnicas de ensayo en equipo edométrico y triaxial. Su conclusión es que el método directo de medida de la presión de hinchamiento (es decir, el ensayo a volumen constante) es el más efectivo, especialmente si se realiza en equipos triaxiales, que permiten seguir la trayectoria de esfuerzos durante el hinchamiento y conocer tanto el esfuerzo axial como el radial. Así mismo, el método triaxial permite conocer el flujo de agua con el tiempo. Sin embargo, los métodos triaxiales apenas se utilizan en materiales muy expansivos, debido al largo tiempo necesario para hidratar completamente las probetas usualmente utilizadas en estos equipos.

Medida de la permeabilidad

Los permeámetros convencionales son inadecuados para la medida directa de la permeabilidad en materiales muy expansivos, debido a la deformación que sufre la muestra

al saturarse y a los flujos tan pequeños generados, lo que provoca tiempos de estabilización muy largos. Para suplir estas limitaciones, se suele recurrir al uso de células triaxiales con presiones de confinamiento y gradientes muy grandes. Sin embargo, la forma más frecuente de determinar la permeabilidad de suelos expansivos es hacerlo indirectamente a partir del análisis de las curvas de consolidación de los ensayos edométricos. Aunque este último método sólo da valores aproximados, está reconocido como estándar europeo.

Khemissa (1998) presenta una célula de acero inoxidable que permite la medida de la permeabilidad de probetas cilíndricas de arcilla envueltas por una camisa flexible. Las probetas se introducen en el interior de la célula, donde pueden someterse a presiones de confinamiento de hasta 20 MPa y temperaturas de 200 °C. El dispositivo acoplado permite la medida de flujos de agua de sólo algunos mm³/h.

El método utilizado en este trabajo, que está basado en la técnica del permémetro de carga fija, sustituye la presión de confinamiento por una celda rígida, aplica la presión de inyección mediante bombas y la medida del flujo de agua mediante precisos aparatos de cambio de volumen. Se describe con detalle en la sección “CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA” y en el Anexo I.

Suelos no saturados

Debido a la complejidad de los fenómenos físico-químicos que tienen lugar en suelos subsaturados y que gobiernan las interacciones agua-sólido, el estudio experimental de estos suelos requiere técnicas más sofisticadas que las utilizadas normalmente en suelos saturados. Los primeros estudios experimentales en suelos subsaturados se realizaron en el campo de la edafología y la hidrología, centrándose fundamentalmente en la determinación de las curvas de retención y de la permeabilidad relativa al agua.

Probablemente, el primer grupo en reconocer la importancia de la presión de los fluidos en los poros para la ingeniería civil fue el de Croney, en el Laboratorio de Investigación de Carreteras de Londres, quienes tomaron la terminología utilizada por los edafólogos y observaron los efectos de la falta de humedad en el comportamiento de los suelos (Croney 1952, Black & Croney 1957).

Por otra parte, en los años 60, diversos autores del ámbito de la geotecnia comenzaron a criticar los procedimientos convencionales de ensayo de muestras expansivas mediante inundación total, ya que es poco probable que la masa de suelo *in situ* tenga una disponibilidad de agua suficiente para saturar completamente el suelo, y menos de forma inmediata. Por este motivo se consideró que las técnicas convencionales proporcionan medidas conservadoras, y surgió la necesidad de reproducir en los ensayos las variaciones del contenido de humedad y las respectivas variaciones de succión o presión intersticial para hacerlos más representativos. El estudio geotécnico de suelos subsaturados comenzó de hecho con la adaptación de la técnica de la traslación de ejes, que se describe en la siguiente sección, al equipo edométrico.

En el Imperial College de la Universidad de Londres, a comienzos de los años 60 se desarrollaron métodos de medida de la presión de aire y agua en los poros, así como equipos para la realización de ensayos de consolidación con aplicación de succión y estudios teóricos sobre la aplicación del principio de esfuerzo efectivo en suelos parcialmente saturados (Bishop & Donald 1961, Bishop & Blight 1963). Esta escuela sigue trabajando en la actualidad (Ridley & Burland 1993, 1995, Dineen 1997).

En la Universidad de Witwatersrand (Sudáfrica) –en parte en conexión con el Imperial College–, se desarrollaron equipos para la realización de ensayos edométricos e isotrópicos con el material sin cambio de humedad, para apoyar la teoría del esfuerzo efectivo en suelos no saturados (Jennings & Burland 1962).

La aplicación de la técnica de traslación de ejes a equipos edométricos, triaxiales y de corte en el laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, Madrid) supuso un desarrollo importante de metodologías, y creó una escuela de investigación (Escario 1967, 1969 y 1980, Escario & Sáez 1973).

En la Universidad de Waterloo (Canadá) se estudiaron los cambios de volumen en suelos parcialmente saturados, tratando el esfuerzo y la succión como dos variables independientes, lo que permite representar la historia de los estados de un suelo en una superficie de estado (Matyas & Rhadakrishna 1968).

En el CSIRO de Australia (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) desde los años 60 también se estudiaron aspectos teóricos sobre el comportamiento de los suelos no saturados y se desarrollaron diversos equipos de control y medida de succión. En particular pueden destacarse los trabajos de Richards. Es notable su aportación en el uso de la técnica psicrométrica para la medida de la succión (Aitchison 1959, Aitchison & Martin 1973, Richards 1965, 1967, 1978, 1984, Richards et al. 1984, Woodburn et al. 1993).

Por otra parte, Lytton (1967), desde la Universidad de Texas A & M, fue uno de los pioneros en el establecimiento de una base teórica sólida para el estudio de suelos no saturados.

La Universidad de Saskatchewan (Canadá) también se ha distinguido desde los años 70 por sus investigaciones en el campo de los suelos no saturados, existiendo actualmente un Grupo de Suelos no Saturados dependiente del Departamento de Ingeniería Civil (Krahn & Fredlund 1972, Fredlund & Morgenstern 1977, Fredlund et al. 1978, Fredlund & Hasan 1979, Fredlund & Rahardjo 1993). También en Canadá, la Universidad McGill ha promovido el estudio de los mecanismos de flujo en medios no saturados (Wong & Yong 1975).

En la Facultad de Ingeniería Civil del Israel Institute of Technology (Haifa) se realizaron estudios sobre la relación entre presión de hinchamiento o resistencia al corte y succión (Kassiff & Ben Shalom 1970, 1971, Komornik & Zeitlen 1965, Komornik et al. 1980).

En el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña se trabaja desde principios de los años 80 en la modelización del comportamiento de suelos no saturados y en el desarrollo de técnicas experimentales para su estudio (Gens et al. 1979, Lloret & Alonso 1980, Josa et al. 1987, Alonso et al. 1987 y 1990). Esto ha dado lugar a un importante número de tesis doctorales relacionadas con el tema, algunas de las cuales se refieren en las siguientes secciones (Lloret 1982, Gili 1987, Josa 1988, Gehling 1994, Navarro 1996, Romero 1999).

El grupo CERMES, perteneciente a la Ecole Nationale des Ponts et Chaussées y al Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris) investiga el comportamiento de suelos

no saturados, desarrollando equipos para la realización de ensayos bajo succión controlada que se describen más adelante (Délage 1987, Délage et al. 1987).

A continuación se describen los principales métodos de medida y control de la succión, ya que, como se verá en la siguiente sección, la medida de la succión es complicada, por lo que la mayor parte de los estudios experimentales se hacen controlando la succión en lugar de medirla. Más adelante se repasa la evolución de la aplicación de estas técnicas a los estudios de diferentes aspectos del comportamiento de los suelos no saturados (cambio de volumen, permeabilidad y resistencia).

Medida y control de la succión

La medida de la succión en los suelos se puede realizar por métodos directos e indirectos.

La medida directa es compleja y sólo es posible para intervalos de succión muy bajos. Esta medida se realiza mediante el intercambio de agua entre el instrumento y el suelo, impulsado por la presión negativa del agua de los poros. Resulta relativamente fácil para valores inferiores a 70 kPa, utilizando **tensiómetros**. En el Imperial College (Londres) se ha desarrollado un instrumento constituido por un transductor de presión diminuto capaz de soportar elevadas presiones negativas absolutas y una piedra porosa de alto valor de entrada de aire, que puede medir hasta 1,5 MPa, aunque con algunos problemas de cavitación (Ridley & Burland 1993). Por otra parte, la humedad relativa puede medirse utilizando **psicrómetros**, y transformarse posteriormente a succión aplicando la ecuación de Kelvin. En suelos se emplean psicrómetros de efecto Peltier, previamente calibrados con disoluciones salinas. Permiten la medida de succiones de entre 0,1 MPa y 6,0 MPa.

Los métodos indirectos se basan en la utilización de un medio poroso calibrado que se pone en contacto con el suelo. Una vez que la humedad del conjunto suelo-medio poroso se ha equilibrado, la succión es igual en ambos. Si alguna de las propiedades del medio poroso sensible a la humedad —como la resistividad eléctrica, la constante dieléctrica, la conductividad térmica o el peso— se ha calibrado para una succión dada, la medida de esta propiedad dará el valor de la succión según la curva de calibración (Delage 1993). Estos

métodos tienen la limitación de ser muy sensibles a la histéresis, por lo que cualquier ciclo de humedad en el suelo altera la medida obtenida.

De entre estos métodos el más simple es el del **papel de filtro**, en el que un papel de filtro cuya curva de retención se conoce se pone en contacto con la muestra de suelo hasta que las humedades de ambos se equilibren. En este momento se determina con precisión la humedad gravimétrica del papel y la succión a que corresponde a partir de su curva de retención. Con este método se pueden medir succiones de entre 0,1 kPa y 150 MPa. El método de la **célula de yeso** mide la variación en la resistencia eléctrica de una placa porosa (escayola o yeso) colocada en contacto con el suelo. La placa porosa se calibra previamente para determinar la relación resistencia eléctrica/humedad y la relación succión/humedad de la escayola. Se pueden medir succiones en el intervalo de 40 kPa a 3 MPa. También existen sensores que miden el contenido volumétrico de agua a partir de la medida de la conductividad térmica del suelo, como el **bloque térmico**, que consiste en un pequeño calentador insertado en un bloque cerámico poroso con el que se pueden medir succiones de entre 0 y 0,3 MPa (Fredlund et al. 1992). Los **sensores comerciales de tipo capacitivo** determinan la humedad relativa del suelo a partir de la variación de la constante dieléctrica de un medio poroso previamente calibrado. Se pueden aplicar en todo el intervalo de succión, puesto que pueden determinar humedades relativas de entre 0 y 100 %. La principal limitación de estos sensores es su tamaño, demasiado grande para ser utilizado en ensayos de laboratorio convencionales.

Como se ha visto, las técnicas de medida de succión sólo abarcan un intervalo limitado de valores, insuficiente para las elevadas succiones que pueden existir en un material expansivo no saturado. Esto, unido a las dificultades experimentales que supone el estudio del comportamiento del suelo con medida simultánea de la succión, provocó el desarrollo de técnicas para permitir el control de la succión a la que el suelo está sometido. Tres son los métodos más utilizados: la translación de ejes, el control de la humedad relativa y la técnica osmótica.

- **Traslación de ejes.** Es la técnica de control de succión más utilizada y que se ha adaptado a un mayor número de equipos para ensayos geotécnicos. Está basada en que la fase líquida en un medio poroso sufre un aumento de presión igual al de la

fase gaseosa (Hilf 1956). Para aplicarlo se utiliza la placa de presión o la celda de membrana (Coleman & Marsh 1961). La muestra se introduce en una celda hermética en contacto con agua a presión atmosférica a través de una placa porosa de alto valor de entrada de aire o de una membrana semipermeable (Figura 38). Inmediatamente se presuriza la celda, pero esta interfase siempre permanece saturada, puesto que el valor de entrada de aire de la placa porosa es mayor que la presión en el interior de la celda, y la membrana es permeable al agua pero no al gas. El aumento de presión en la cámara hace aumentar en la misma cantidad la presión de aire en los poros del suelo. Habrá una transferencia de humedad entre la muestra y la interfase hasta alcanzar el equilibrio, en cuyo instante la presión de agua en la interfase y en el suelo será la atmosférica. Por tanto, la presión de aire aplicada es igual a la succión del suelo en las condiciones del final del ensayo ($s = u_a - u_w$). El método asume la continuidad de la fase gaseosa, por lo que su aplicación en condiciones próximas a la saturación, en las que puede haber importantes cantidades de aire ocluido, puede conducir a sobrestimar el valor de la succión (Bocking & Fredlund 1980). Por otra parte, tanto la placa porosa como la membrana son permeables a las sales disueltas, por lo que el método sólo garantiza el control de la succión matricial, pero no de la osmótica. Cuando se utiliza la membrana semipermeable se puede llegar a succiones de hasta 20 MPa, estando este valor definido por las limitaciones mecánicas de la celda. Thomé (1993) propone el uso de muelles sobre la muestra para garantizar el buen contacto entre ésta y la membrana o la piedra porosa. Otro método de control de la succión que aplica el principio de la traslación de ejes es la placa de succión, con la que se pueden aplicar succiones de entre 0 y 0,1 MPa, porque para valores superiores el agua entra en cavitación (Croney & Coleman 1960).

- **Control de la humedad relativa.** Esta técnica se aplica sobre todo para succiones elevadas. Consiste en poner la muestra en una cámara cerrada en la que la humedad relativa tenga un valor tal que genere la succión deseada, según viene dado por la ley de Kelvin. Normalmente se utiliza un desecador de vacío sobre cuya placa de porcelana se pueden colocar varias muestras (Figura 16). En el fondo del desecador se introduce la disolución apropiada en cantidad suficiente. Se pueden utilizar

disoluciones saturadas de sales o disoluciones de determinado producto a diferente concentración, frecuentemente ácido sulfúrico. En este último caso la concentración del producto determina la actividad de agua de la disolución (presión parcial de vapor), y por tanto, la humedad relativa generada. La transferencia de humedad entre el ambiente y la muestra tiene lugar en fase vapor, por un proceso de difusión que sigue la ley de Fick, por lo que el proceso es lento. Para acelerarlo se hace el vacío en el desecador. Puesto que las sales contenidas inicialmente en la muestra no pueden salir de ella, esta técnica controla tanto la succión matricial como la osmótica. Con disoluciones salinas saturadas se pueden aplicar succiones de entre 2 y 160 MPa, mientras que con disoluciones de ácido sulfúrico de diferente concentración, el intervalo de succiones está entre 3 y 1000 MPa (Esteban 1990), aunque sólo se tiene un buen control de la succión para valores inferiores a 600 MPa.

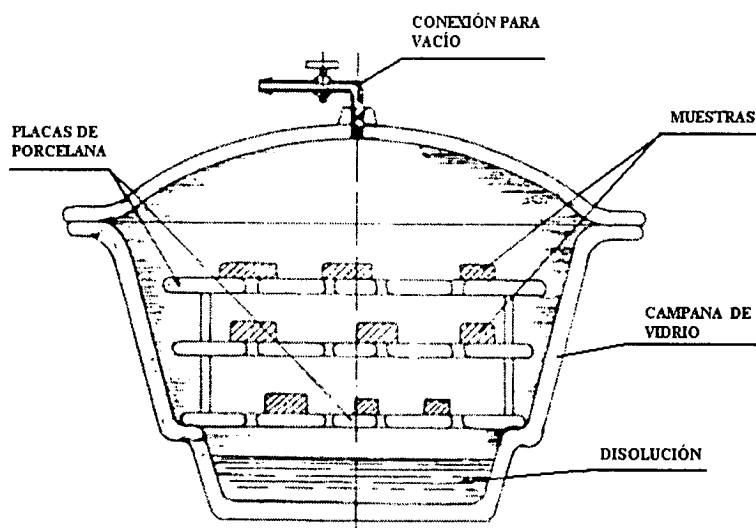


Figura 16: Desecador con disolución para control de la humedad relativa (Esteban 1990)

- **Técnica osmótica.** El principio de este método es que el potencial del agua aumenta con la presión hidrostática y disminuye con la concentración de solutos. Así, una disolución confinada en contacto con agua libre a través de una membrana semipermeable estará en equilibrio cuando la presión hidrostática aplicada a la disolución sea igual a su succión osmótica, lo que constituye la presión osmótica.

Para la aplicación de esta técnica se utiliza una membrana semipermeable y una disolución de moléculas orgánicas de gran tamaño (polietilenglicol, PEG). Las moléculas de la disolución no pueden atravesar la membrana, pero el agua sí. Por tanto, al poner la disolución en contacto con el agua del suelo, aquélla ejercerá una atracción osmótica sobre el agua del suelo, hasta que las concentraciones de ambas se equilibren. La succión aplicada es función de la concentración de la disolución, y puede ser de hasta 2 MPa en ausencia de presión mecánica. Este método sólo aplica succión matricial, puesto que las membranas son permeables a los iones y éstos pueden salir del agua del suelo a la disolución. Recientemente, Delage et al. (1998) han ampliado el intervalo de succión del método osmótico para determinación de las curvas de retención hasta 10 MPa.

Como resumen de las principales características y aplicaciones de las técnicas de medida y control descritas se ofrece la siguiente tabla:

Tabla III: Técnicas de medida y control de succión (Ridley & Burland 1993)

Técnica	Tipo de succión	Uso principal	Tipo de medida	Intervalo (MPa)	Tiempo de equilibrio
<i>Desecador de vacío</i>	Total	Laboratorio	Indirecta	1-1000	Meses
<i>Psicrómetro</i>	Total	Campo	Indirecta	0,1-7	Meses
<i>Papel de filtro</i>	Total	Campo	Indirecta	1-30	Semanas
	Matricial	Laboratorio		0,03-30	1 semana
<i>Célula de yeso</i>	Matricial	Campo	Indirecta	0,03-3	Semanas
<i>Bloque térmico</i>	Matricial	Campo	Indirecta	0-0,3	Días
<i>Placa de succión</i>	Matricial	Laboratorio	Directa	0-0,1	Horas
<i>Tensiómetro</i>	Matricial	Campo	Directa	0-1,5	Horas
<i>Placa de presión</i>	Matricial	Laboratorio	Directa	0-5	Horas

Medida del cambio de volumen

Los primeros equipos para medida del cambio de volumen en suelos no saturados fueron edómetros convencionales con un dispositivo para mantener el suelo aislado del exterior y en los que se aplicaba la succión mediante una columna de mercurio. El máximo valor de succión alcanzado era de 0,1 MPa (Escario 1965, 1967). Posteriormente, Escario (1969) desarrolló un aparato que permite medir hinchamientos y presiones de hinchamiento bajo sobrecarga, con control de la succión hasta 10 MPa. Como en el equipo anterior, el control de la succión está basado en el principio de la traslación de ejes. La muestra se confina lateralmente en un anillo y se coloca sobre una membrana semipermeable que asienta sobre una placa porosa, dentro de una cámara de presión suficientemente robusta. Esta cámara se presuriza con gas nitrógeno. Sobre la muestra se coloca otra piedra porosa de grano grueso que permite la acción del gas sobre los poros del suelo. Por encima de la piedra porosa un disco metálico rígido recibe las cargas verticales a través de un pistón (Figura 17). Escario & Sáez (1973) realizaron una modificación posterior de esta célula. Estos autores destacaron la elevada compresibilidad de la membrana de celulosa, y la repercusión que esto tiene sobre la deformabilidad total del equipo, no atribuible a la muestra, y que por tanto, debe ser calibrada. Otra modificación de esta celda permite, mediante la colocación de una banda extensométrica en el interior del anillo, la medida de la presión lateral (Cuéllar 1978).

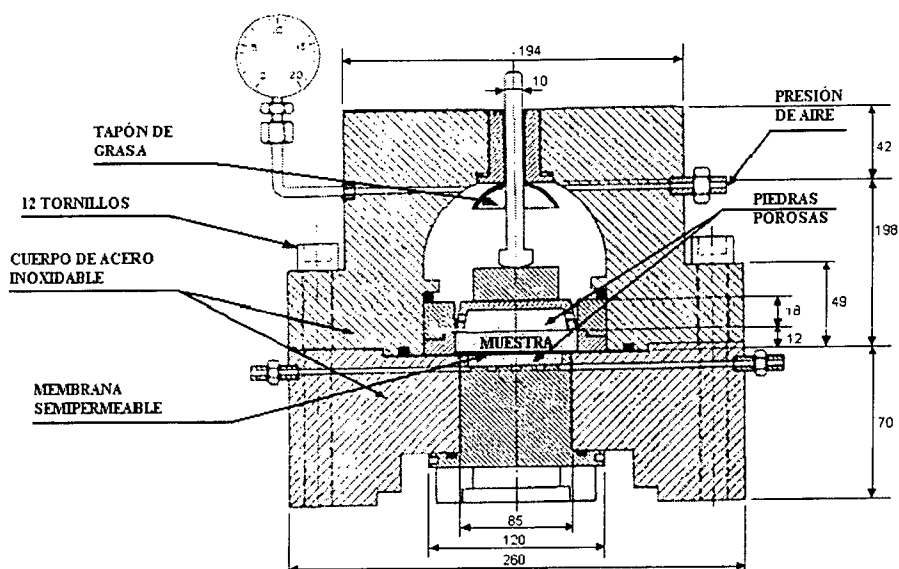


Figura 17: Edómetro con control de succión mediante presión de gas (Escario 1969)

Kassiff & Ben Shalom (1970) desarrollaron un equipo para medida del potencial de hinchamiento (consolidómetro) en el que la toma de agua por parte de la muestra se controla mediante un sistema osmótico. Una membrana semipermeable de celulosa, en contacto con la parte superior e inferior de la muestra, separa a ésta de la disolución osmótica de polietilenglicol. Dependiendo de la concentración de la disolución, se pueden obtener presiones osmóticas de hasta 2 MPa. Vicol (1990) y Delage et al.(1992) mejoraron el edómetro con succión controlada mediante el método osmótico, introduciendo un circuito cerrado y una bomba, con el fin de garantizar la circulación de la disolución y para permitir un control más preciso del volumen de agua intercambiado.

Lloret (1982), en una célula Rowe modificada, controla las presiones de aire y agua y mide la entrada de agua a través de una piedra porosa de alto valor de entrada de aire.

Pousada (1984) realizó un estudio de los mecanismos de deformabilidad de arcillas expansivas, prestando especial atención al control de la succión, a los efectos de las condiciones de compactación, de la sobrecarga, y de la repetición de ciclos de humectación-dsecación. Para ello utilizó el edómetro con control de succión mediante presión de nitrógeno de Escario & Sáez (1973), y unas sencillas células de consolidación de suelos semisaturados. Estas células permiten aislar la muestra del ambiente exterior, evitando así las variaciones de humedad del suelo a ensayar.

Esteban (1990) utilizó en su Tesis Doctoral sobre caracterización experimental de la expansividad de una roca evaporítica, realizada en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, diferentes tipos de edómetros modificados para trabajar con muestra no saturada. El más sencillo, construido enteramente en acero inoxidable para evitar su corrosión, consta de una camisa de perpex que cubre la celda herméticamente y que evita el intercambio de humedad con la atmósfera. De esta manera se consigue mantener la muestra no saturada, pero sin tener control sobre el valor de la succión. Para los ensayos con control de succión hasta 12 MPa utilizó una modificación de las celdas de membrana diseñadas por Escario & Sáez (1973). Para succiones superiores, desarrolló una celda edométrica en la que el control de la succión se realiza imponiendo una humedad relativa determinada mediante disoluciones de ácido sulfúrico de diferente concentración que se vierten en un depósito colocado en el interior de la celda (Esteban & Sáez 1988). Estas celdas edométricas con control de succión, tanto la de membrana de presión como la de disoluciones, son las utilizadas en el presente estudio, por lo que, tanto las celdas como la relación entre la concentración de la disolución de ácido sulfúrico y la humedad relativa que genera, se describen en la sección “Ensayos edométricos con succión controlada” y en el Anexo V. Según el autor, mediante las disoluciones se pueden aplicar succiones de entre 0 y 1000 MPa.

Entre las investigaciones recientes centradas en aspectos experimentales cabe citar la de Gehling (1994) sobre suelos moderadamente expansivos (arcilla de Madrid, bentonita, arena y sus mezclas) –ensayados en edómetros convencionales y en edómetros con control de succión mediante presión de gas hasta 5 MPa–, cuya contribución más destacable es la de haber comprobado diferentes aspectos del comportamiento de suelos expansivos no saturados del modelo de Gens & Alonso (1992).

En el Imperial College de Londres se ha desarrollado un sistema edométrico que permite simultáneamente la medida de la deformación radial y el control y medida de la succión hasta 1,5 MPa. La succión de la muestra se controla utilizando la técnica osmótica (Dineen & Burland 1995, Dineen 1997) a través de una membrana semipermeable en contacto con la base de la muestra. La succión se mide en la parte superior de la muestra utilizando hasta tres sondas de succión desarrolladas en el Imperial College y descritas más arriba

(Ridley & Burland 1993). Un sistema de compensación de aceite se utiliza para impedir la deformación lateral de la muestra durante el ensayo (Figura 18).

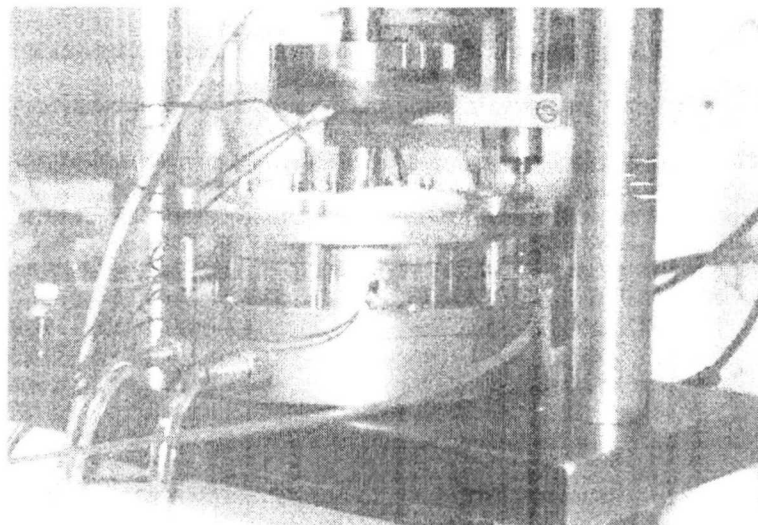


Figura 18: Célula edométrica desarrollada en el Imperial College (Dineen & Burland 1995)

Romero (1999) realiza en su Tesis Doctoral un estudio del comportamiento volumétrico de arcillas no saturadas sometidas a cambios de succión y temperatura. Para ello utiliza fundamentalmente células edométricas con control de la succión y la temperatura, aunque también, para analizar el comportamiento en condiciones isotrópas, utiliza una “mini-celda” isotrópa y un equipo triaxial modificado. En todas ellas la succión se aplica mediante la técnica de traslación de ejes, hasta valores de 1 MPa. Las temperaturas de trabajo han llegado hasta 80 °C. Las células edométricas están diseñadas para permitir la realización de trayectorias de carga, succión y temperatura controladas. Además se realizó la adaptación de un edómetro con medida de presión lateral para la realización de ensayos con control de succión y de medidas de la presión de hinchamiento sin cambio de volumen. El control de la succión en el equipo triaxial utilizado se realiza en ambos extremos de la muestra, lo que reduce los tiempos de estabilización. Las deformaciones laterales se miden mediante un sistema de láser electro-óptico y las deformaciones axiales mediante LVDTs internos.

Medida de la permeabilidad

A pesar de las complicaciones de las diferentes interacciones físico-químicas entre las tres fases presentes en los suelos no saturados, las leyes que gobiernan el flujo de los diferentes constituyentes no son muy diferentes de las clásicas que se aplican a suelos saturados. En el caso del agua, se ha comprobado experimentalmente la validez de la ley de Darcy, siendo el coeficiente de permeabilidad función del grado de saturación. En cualquier suelo, la permeabilidad aumenta con el grado de saturación. Teniendo esto en cuenta, se define la permeabilidad relativa (k_r) para determinado grado de saturación como la relación entre la permeabilidad subsaturada (k) para ese grado de saturación y la permeabilidad saturada (k_w), por lo que toma un valor entre 0 y 1. En general, se acepta que la permeabilidad relativa está relacionada con el grado de saturación según una ley potencial.

Por otra parte, el flujo de aire está gobernado por la ley de Fick que, cuando el aire se considera como un gas perfecto, se puede asimilar también a la ley de Darcy, con un coeficiente de permeabilidad al gas (k_g). Puesto que no hay interacciones importantes entre el aire y los otros constituyentes del suelo, el flujo de aire depende sólo del gradiente de presión de aire y del volumen de aire en el suelo, que a su vez depende del grado de saturación.

Los métodos de determinación de la permeabilidad al agua en estado no saturado están basados en la medida o en el control de la succión, lo que es necesario para conocer el valor del gradiente. Los métodos de laboratorio pueden clasificarse en dos grandes grupos: estacionarios y transitorios (Klute & Dirksen 1986, Dirksen 1991), algunos de los cuales se describen a continuación. La mayoría de ellos aplica la ley de Darcy de forma más o menos rigurosa o con alguna simplificación.

Entre los métodos estacionarios se encuentran los siguientes:

- **Presión controlada** (head-controlled). Consiste en la realización de medidas en estado estacionario en una columna de suelo en la que la succión se controla en ambos extremos, normalmente mediante piedras porosas, de manera que sea uniforme en toda su longitud (Corey 1957). Las medidas se realizan con tensiómetros. Para succiones

superiores a 30 kPa, los tiempos necesarios para alcanzar el estado estacionario pueden ser muy largos.

- **Flujo controlado.** En este caso, las medidas se realizan sobre una columna de suelo en la que, en uno de sus extremos, se aplica un caudal controlado (Wooding 1968).

Entre los métodos transitorios más utilizados están el del perfil instantáneo y el de la placa de presión:

- **Perfil instantáneo.** Las humedades y los potenciales hidráulicos se miden en función del tiempo a diferentes profundidades durante el drenaje de una columna de suelo inicialmente saturada. Para determinados tiempos y profundidades, se deduce la humedad a partir del valor de succión medido, con ayuda de la curva de retención previamente determinada. Conociendo la succión local y la humedad se puede calcular la permeabilidad en función del grado de saturación. Los potenciales hidráulicos se miden directamente utilizando tensiómetros, manómetros de mercurio o transductores de presión. Daniel (1982) utilizó psicrómetros para medir el potencial de agua, lo que permite ampliar el intervalo de grados de saturación que se pueden ensayar hasta valores de entre 20 y 90 %, dependiendo del tipo de suelo. Recientemente, en CIEMAT se han utilizado sensores de humedad relativa de tipo capacitivo para determinar el valor de la succión en diferentes puntos de una columna de suelo durante ensayos de evaporación/infiltración, lo que permite cubrir todo el intervalo de grados de saturación (Villar & Martín 1999).
- **Método de evaporación.** Es una modificación del método del perfil instantáneo que permite determinar simultáneamente la curva de retención y la conductividad hidráulica de la misma muestra. Una columna de suelo inicialmente saturada se deja evaporar por su parte superior mientras se registra la pérdida de peso total y los gradientes de presión en, al menos, dos profundidades diferentes. Con estos datos se puede calcular la curva de retención mediante un método iterativo. Conocida ésta se puede determinar la densidad de flujo en varios puntos, lo que permite calcular la conductividad hidráulica aplicando la ley de Darcy (Wind 1966).

- **Placa de presión** (Gardner 1956). Este método utiliza el equipo de placa de presión descrito en la sección “Medida y control de la succión”, que está basado en el principio de traslación de ejes. La muestra en el interior de la celda se somete a una succión progresivamente más alta mientras se mide el flujo de salida de agua en función del tiempo. Los incrementos de succión deben ser lo suficientemente pequeños para suponer que la conductividad hidráulica es constante y que la relación entre humedad y succión es lineal. Los resultados obtenidos se interpretan aplicando la ecuación de Richards con numerosas simplificaciones y suposiciones. Con esta técnica, Romero (1999) ha medido recientemente la permeabilidad de la arcilla de Boom utilizando los datos de flujo de entrada y salida de ensayos de humectación/secado realizados en celdas edométricas con control de succión matricial. Una variante de este método, de más rápida realización aunque de análisis de datos más complejo, es el “**one-step outflow**”.

Ninguno de estos métodos es directamente aplicable a materiales expansivos, debido a las variaciones de volumen que experimentan en función del grado de saturación, a la lentitud de los procesos de evaporación e infiltración, y a lo inadecuado de los procedimientos habituales de medida del potencial de agua para las succiones que se encuentran en estos materiales. Un método alternativo para el cálculo de la permeabilidad en estos materiales es el retroanálisis de ensayos de infiltración en condiciones transitorias, mediante aplicación de un modelo teórico para resolver el problema inverso (Kool et al. 1985; Pintado et al. 1998). Esto permite identificar el exponente de la ley de permeabilidad subsaturada y, si además se aplica un flujo térmico, el valor de la tortuosidad.

Además, existen métodos numéricos que permiten el cálculo de la permeabilidad relativa a partir de otras propiedades del suelo conocidas, como la curva de retención, la distribución porosimétrica o granulométrica, o la conductividad hidráulica saturada. Estos métodos teóricos están basados generalmente en modelos de la distribución estadística de los tamaños de poro, que asumen que el flujo de agua se produce a través de poros cilíndricos y que incorporan las ecuaciones de Darcy y Poussuille (Burdine 1953). Los diferentes métodos utilizan estos parámetros por separado o combinados. Por ejemplo, un procedimiento muy habitual de predecir empíricamente la función de permeabilidad de un suelo subsaturado es utilizar la curva de retención y el coeficiente de permeabilidad

saturada, utilizándose este último como factor de ajuste para que los cálculos sean más precisos (Marshall 1958, Mualem 1976, Fredlund & Rahardjo 1993). Otros autores han desarrollado modelos para calcular la conductividad subsaturada a partir de la curva de retención medida (Millington & Quirk 1961). Una técnica muy utilizada es la de ajustar los datos de la curva de retención a una ecuación “cerrada” que utilice los mismos parámetros que la expresión analítica de la permeabilidad relativa. Entre los ajustes de este tipo más utilizados está el de van Genuchten (1980). Recientemente se han desarrollado modelos que calculan la conductividad hidráulica del suelo en función de la humedad a partir de su densidad y de la distribución de tamaño de partícula del suelo (Arya et al. 1999). A partir de la granulometría derivan la distribución de tamaño de poro, y a partir de ésta la conductividad, puesto que se asume que el flujo de agua es función del tamaño de los poros.

Se han desarrollado incluso programas comerciales que realizan el cálculo del coeficiente de permeabilidad a partir de otros parámetros. Por ejemplo, el código RETC (van Genuchten et al. 1991) calcula de permeabilidad relativa, la difusividad y los cinco parámetros de ajuste de la ecuación de van Genuchten a partir de los datos de la curva de retención y del valor de la conductividad hidráulica para un único grado de saturación. El código Rosetta (Schaap 1999) calcula los parámetros de retención de van Genuchten (1980) y la conductividad hidráulica saturada utilizando la clase textural, la distribución textural, la densidad y uno o dos puntos de la curva de retención.

El ajuste entre los valores obtenidos mediante modelos teóricos y los valores experimentales no es siempre satisfactorio, o al menos no para todo el intervalo de succiones y especialmente en suelos de textura muy fina, pero su uso está muy extendido porque facilitan y abaratan extraordinariamente el conocimiento de una propiedad clave para comprender y predecir los procesos de transporte en el suelo.

Medida de la resistencia

Los primeros aparatos desarrollados para el estudio de la resistencia al corte en suelos no saturados fueron presentados por Bishop & Donald (1961). Consisten en una célula triaxial modificada que permite la medida o control de la presión de agua y aire, y medida

independiente de los cambios volumétricos de agua y de la probeta. El control de la succión se realiza aplicando el principio de traslación de ejes. La piedra porosa se coloca en la base de la celda, y la presión de aire se aplica en la parte superior de la muestra. Al desaturarse la muestra, el agua se expulsa por la parte inferior. Para evitar la fuga de gas a través de la membrana que enfunda la probeta, ésta se rodea de mercurio. El nivel de mercurio en la celda indica también los cambios de volumen de la muestra.

El principio de traslación de ejes también se ha aplicado a otros equipos triaxiales, como el diseñado por Escario (1980), en el que la presión de gas se aplica a través de una piedra porosa de grano grueso colocada en la parte superior de la probeta enfundada. La piedra porosa inferior, en contacto con agua a presión atmosférica, es de alto valor de entrada de aire, para garantizar su saturación permanente. Los cambios de volumen durante el ensayo se miden utilizando un método óptico.

En el CEDEX se desarrolló también un equipo de ensayo de corte directo en el que la succión se controla mediante la inyección de nitrógeno (Escario 1980, Escario & Sáez 1986). Si se utilizan piedras porosas de alto valor de entrada de aire se pueden aplicar succiones de hasta 1,5 MPa, y con membranas semipermeables de hasta 15 MPa.

Wheeler (1986, 1988) desarrolló en la Universidad de Oxford una celda triaxial de doble pared en la que la presión de agua en los poros de la muestra se mantiene por encima de la atmosférica por el principio de traslación de ejes. La presión de agua se aplica en la base de la muestra mediante un filtro poroso con un valor de entrada de aire de 0,5 MPa, y la presión de aire se aplica en la parte superior de la muestra mediante un filtro con bajo valor de entrada de aire. Los cambios de volumen de la muestra se miden mediante el control del flujo de agua en la cámara interna de la celda.

En el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC se desarrolló un equipo triaxial basado en el de Bishop & Wesley (1975), en el que la succión se controla mediante presión de aire aplicada a través de la piedra porosa superior. La deformación vertical se mide mediante un LVDT sumergido, la deformación radial mediante un anillo flotante asentado en la superficie del mercurio y conectado a un LVDT, y los cambios de volumen del agua en la muestra mediante la variación del nivel en un depósito de mercurio incluido en el circuito de control de la presión intersticial (Josa 1988, Josa et al. 1987).

Komornik et al. (1980) desarrollaron un sistema de ensayo del hinchamiento y de la resistencia al corte de muestras compactadas parcialmente saturadas que aplicaron a arcillas con un potencial de hinchamiento relativamente alto. Para controlar la humedad utilizaron el método osmótico. El equipo consta de una celda triaxial modificada en la que se introduce la muestra cilíndrica con una perforación central cubierta por una membrana de celulosa que está en contacto con la disolución osmótica. Al mismo tiempo, la parte externa de la muestra está sometida a la presión confinante de la cámara de la celda. Se aplicaron succiones de entre 25 kPa y 0,3 MPa. Delage et al. (1987) también desarrollaron un sistema en el que dos membranas semipermeables se colocan en la base y parte superior de la muestra. La disolución osmótica circula por detrás de las membranas. De esta manera la succión se controla en los dos extremos de la muestra, lo que permite reducir los tiempos de equilibrio. Las curvas típicas de esfuerzo/deformación y de variación de volumen obtenidas con este equipo muestran el aumento de la resistencia, rigidez, fragilidad y comportamiento dilatante del suelo con la succión (Cui 1993).

Para el estudio termo-hidro-mecánico de suelos no saturados en trayectorias cuasiestáticas, Saix & Jouanna (1990) presentan un equipo “triaxial térmico”. El control de la presión de gas y de agua se realiza de forma independiente en la parte superior e inferior de la probeta, respectivamente. La cámara de la celda donde está confinada la probeta se rellena de aceite, a través del cual se aplica la presión radial. La temperatura se regula mediante resistencias eléctricas insertadas en el cuerpo de la celda (pared, tapa y base), que permiten alcanzar hasta 80 °C. Todo el conjunto se rodea de un sistema de aislamiento térmico. El volumen de agua que entra y sale de la muestra se mide por el desplazamiento en un capilar del menisco formado por el agua y un líquido no miscible con ella y de densidad ligeramente inferior. A través de este mismo sistema se mide o controla la succión capilar, mediante un manómetro de mercurio. Un disco de bronce perforado, colocado en la parte superior de la muestra, permite la transferencia gaseosa entre la muestra y el exterior. La medida de todas las variables en función de la temperatura, exige el calibrado previo del equipo en las mismas condiciones.

Recientemente, en la Universidad de Manitoba (Canadá) se ha puesto a punto un equipo triaxial con control de la succión mediante la técnica de equilibrio de vapor y medida simultánea de la succión mediante psicrómetros (Blatz & Graham 2000). La solución

iónica que genera la succión deseada se coloca en un desecador que se conecta a la base de la muestra. La parte superior de la muestra está así mismo conectada con el desecador mediante una bomba y un medidor de flujo de aire, con lo que se produce el paso del vapor a través de la muestra, favorecido por la colocación de tiras de geotextil a lo largo de ésta. Los psicrómetros se colocan en dos posiciones diferentes en el interior de la muestra, y pueden medir succiones de hasta 8 MPa.

Finalmente, hay que destacar que ninguno de los equipos mencionados es comercial, sino que se trata de prototipos desarrollados para investigaciones específicas, cuyo manejo es complejo y cuyas succiones de trabajo son muy bajas para ser equipos útiles en bentonita.

MATERIAL

MATERIAL

Todo el trabajo experimental recogido en este documento se ha realizado sobre bentonita proveniente del yacimiento Cortijo de Archidona, seleccionado por ENRESA durante fases anteriores de investigación como material de referencia para el relleno y sellado de un almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos de alta actividad (*cf.* sección “EL ESTUDIO DE LAS BARRERAS DE ARCILLA EN ESPAÑA”). De este yacimiento también se extrajo la arcilla S-2, estudiada intensamente en proyectos de investigación anteriores referidos en las secciones previas.

El yacimiento Cortijo de Archidona está localizado en el extremo SE de la Serrata de Níjar, 12 km al SE del pueblo del mismo nombre (Almería). La Serrata de Níjar está formada por una sucesión de pequeñas colinas, con dirección NE-SO, cuya longitud es de unos 11 km, con una anchura media de 1,5 km. La zona se sitúa en el cuadrante III del Mapa del IGN escala 1:25.000 de Fernán Pérez.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La Serrata de Níjar constituye, junto a la Sierra de Cabo de Gata, la región volcánica de Cabo de Gata. Los materiales volcánicos de esta región forman parte de un conjunto más extenso que se encuentra en gran parte sumergido bajo el mar de Alborán y cuyos principales yacimientos emergidos se encuentran al SE de las provincias de Almería y Murcia, en la isla de Alborán y en el norte de África. El origen de este volcanismo está asociado a la dinámica geotectónica del Mediterráneo occidental durante el Neógeno. La datación radiométrica de los episodios volcánicos, que son de tipo calco-alcalino, indica edades de entre 15 y 7 millones de años (Fernández 1992). Este vulcanismo tuvo lugar frecuentemente en condiciones submarinas someras. Posteriormente se produjeron tanto episodios de emersión de los complejos volcánicos como de inmersión, como lo muestran las intercalaciones de paleosuelos, calizas bioclásticas y materiales arrecifales. Por ello, las rocas volcánicas han estado expuestas tanto a la acción de aguas meteóricas como marinas,

en ambos casos ligadas a sistemas hidrotermales originados por la misma actividad volcánica. La acción de estos fluidos a diferentes temperaturas contribuyó a la alteración de las rocas volcánicas, dando lugar, según la composición de las soluciones, a sílice, alunita, jarosita, caolinita o bentonitas.

La Serrata de Níjar es un complejo volcánico que forma parte de un horst intensamente fracturado delimitado por dos fracturas paralelas de dirección NE-SO que lo sitúan paralelamente a la Sierra de Cabo de Gata, que se encuentra al SE. La Figura 19 muestra la localización de la zona en el contexto del SE peninsular. Junto con abundantes rocas volcánicas, afloran en esta área materiales del substrato Bético y calizas y dolomías triásico-jurásicas.

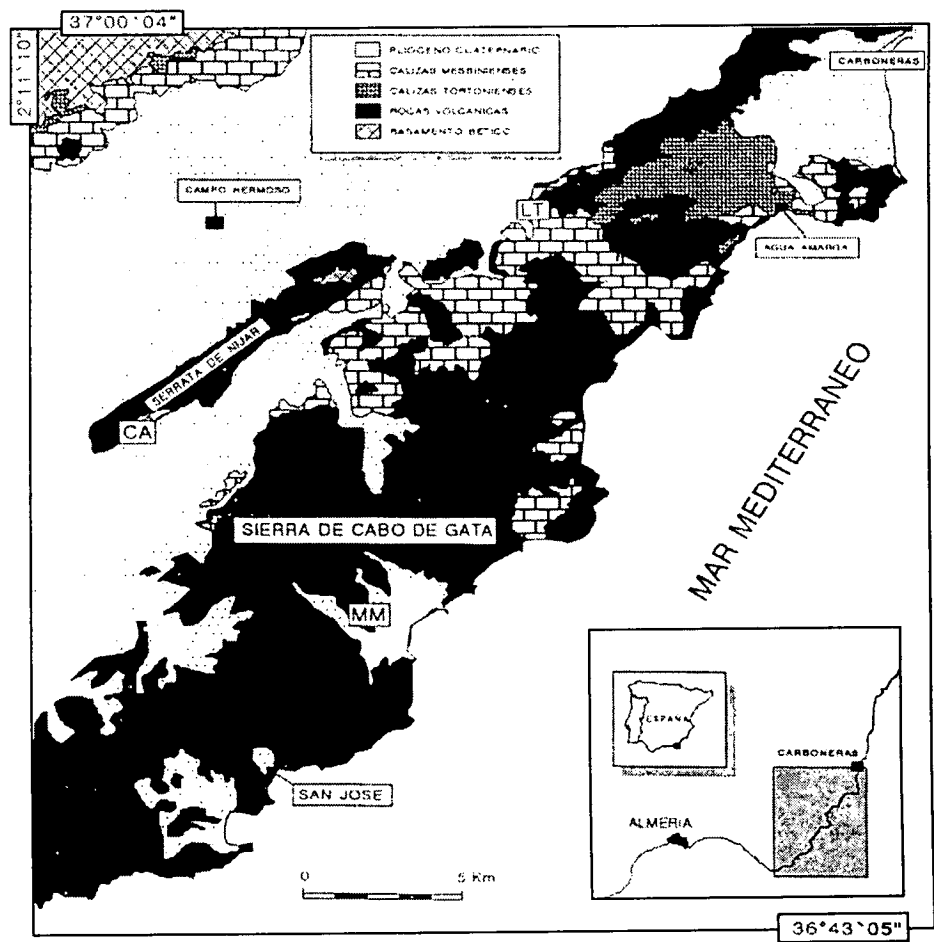


Figura 19: Situación del yacimiento Cortijo de Archidona (CA) en el contexto geológico del SE español (tomada de Delgado, 1993)

El yacimiento de bentonitas de Cortijo de Archidona se sitúa al sur de la Serrata de Níjar, localizándose en la hoja 1046 del Mapa Geológico del IGME escala 1:50.000 correspondiente a Carboneras. La Figura 20 muestra un esquema geológico del yacimiento, en el que se pueden apreciar la disposición de los materiales que, de más antiguo a más moderno son (Delgado 1993):

- Substrato Bético, constituido fundamentalmente por una caliza brechoide de edad jurásica, además de por dolomías y filitas triásicas.
- Rocas volcánicas, entre las que se encuentran tobas poligénicas y dacíticas, dacitas anfibólicas, vitrófidos riodacíticos, brechas piroclásticas de dacita y andesita y vitrófidos.
- Cobertera sedimentaria, formada por materiales pliocénicos y cuaternarios, que constituyen el límite SE de la zona bentonitizada, con la que se pone en contacto mediante una gran falla.

La geometría de la cantera de la que se extrae el mineral sigue dos direcciones de máxima alteración coincidentes con zonas de fracturación. La masa principal de bentonita coincide con una falla de dirección NO-SE y es donde se han desarrollado las labores mineras más importantes; una segunda zona, donde el volumen de material alterado es menor, coincide con una falla de dirección NE-SO.

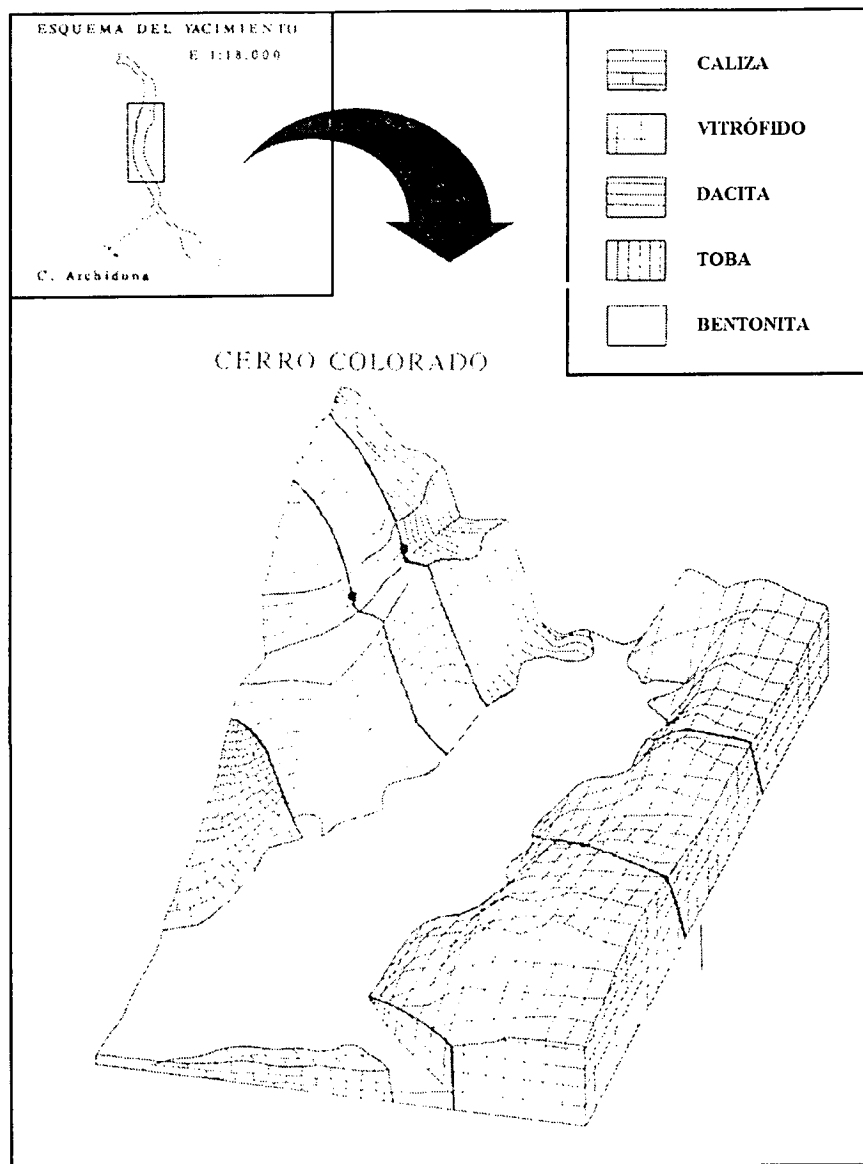


Figura 20: Esquema del yacimiento Cortijo de Archidona y materiales asociados (tomado de Delgado, 1993)

ORIGEN

Las rocas volcánicas que contienen cantidades importantes de vidrios volcánicos son fácilmente alterables, debido a su desordenada estructura interna. Si la circulación de fluidos se ve favorecida por la elevada permeabilidad del material –como en el caso de las

tobas volcánicas–, o por la existencia de fracturas, este proceso se verá potenciado, aumentando su alcance si también lo hace la temperatura.

Los estudios realizados sobre las bentonitas de la región de Cabo de Gata concluyen que éstas se han formado por la alteración hidrotermal de rocas volcánicas ácidas, dacitas y riolitas. El proceso involucra la movilización de sílice, hierro, alcalinos y alcalinotérreos. Los materiales neoformados presentan características diversas que dependen del tipo de roca que ha sufrido la alteración y de la composición química, origen y temperatura de las soluciones alteradoras.

En el yacimiento Cortijo de Archidona los materiales bentonitizados son vidrios riódacíticos vesiculares de tonalidades oscuras e ignimbritas de colores claros. Los procesos de alteración se han favorecido gracias a la intensa brechificación de estos materiales en las zonas de fractura, que al mismo tiempo han permitido el paso de las soluciones alteradoras. La relación entre las zonas de fractura y la bentonitización es evidente en toda la Serrata de Níjar. La zona bentonitizada desaparece hacia el NO y hacia el SE debido a desplazamientos mecánicos originados por la intensa actividad tectónica de la zona durante el Pliocuatrnario.

Los primeros estudios isotópicos realizados en el Cabo de Gata sugirieron que la bentonitización tuvo lugar por efecto de fluidos meteóricos a baja temperatura, en torno a 40 °C para el yacimiento de Serrata de Níjar (Leone et al. 1983). Caballero et al. (1985) consideran que las soluciones hidrotermales que produjeron la alteración de las rocas volcánicas de la Serrata de Níjar a bentonitas eran de tipo clorurado-sódico, con pH neutro o ligeramente ácido.

Estudios isotópicos recientes (Delgado 1993) consideran que las bentonitas del yacimiento del Cortijo de Archidona se produjeron por alteración de vidrios volcánicos intensamente brechificados. En los primeros estadios de hidratación y desvitrificación de la roca intervinieron soluciones hidrotermales, cuya temperatura disminuyó posteriormente hasta valores ambientales, con los que están en equilibrio las esmectitas presentes en el yacimiento.

EXPLOTACIÓN Y PROCESADO

Los depósitos de bentonita de Cabo de Gata se explotan comercialmente a cielo abierto desde la década de los años 50. Existen más de 30 afloramientos, de los cuales los más importantes son el de Los Trancos y el de Cortijo de Archidona. En la Serrata de Níjar existen además otras zonas bentonitizadas, entre las que destacan Cerro Colorado, Collado del Aire, Pecho de los Cristos y Palma del Muerto.

El yacimiento Cortijo de Archidona está explotado por la compañía Minas de Gádor, que ha suministrado el material estudiado en dos fases principales. La primera, hacia 1990, en la que se suministraron 20 t de arcilla molida a tamaño inferior a 5 mm, a los que se dio la referencia S-2. Con este material se ha trabajado hasta 1995. La segunda entrega se realizó en 1995, para el Proyecto FEBEX. La Figura 21 es una vista de la corta de donde se extrajo la bentonita FEBEX.

En este caso se contó con una extracción de 600 t (realizada en la zona señalada en la Figura 21), que se homogeneizaron y prepararon en cantera y en fábrica de acuerdo a los siguientes pasos (ENRESA 1998):

- Homogeneización y secado en cantera: el material acopiado se extiende en una parva para facilitar su arado (Figura 22) y volteo mediante máquinas de cadenas; se desmenuza y homogeneiza por medio de rotavátor y se retiran manualmente los cantos volcánicos, tras lo que se deja secar durante un día. Se realizaron cuatro ciclos de homogeneizado y secado.
- En fábrica se realizaron las siguientes operaciones: fraccionamiento y desmenuzado del material mediante un desmenuzador de palas y, posteriormente, un desintegrador de rodillos lisos y de rodillos con cuchillas; secado en horno rotatorio sin que la arcilla sobrepasase la temperatura de 60 °C; cribado del material por medio de un tamiz de malla 5 mm.



Figura 21: Aspecto de la zona de explotación vista desde el NO. La bentonita FEBEX se tomó de la parte central



Figura 22: Labor de arado de la parva

De esta manera, el producto final tiene una granulometría inferior a 5 mm y una humedad de fábrica de 14 ± 1 %. Este material se ensacó en grandes bolsas impermeables de unos 1300 kg. De cada una de estas bolsas se tomó una muestra de 10 kg. De cada muestra se tomaron 6 kg y todas ellas se mezclaron mediante paleo para obtener una muestra homogénea de referencia 70-IMA-3-4-0 –en adelante FEBEX–, cuarteándose posteriormente. Durante la etapa de caracterización del material se identificaron las principales características físicas, mineralógicas y geoquímicas de las diferentes muestras tomadas durante el procesado de la arcilla en fábrica. Esto permitió comprobar la homogeneidad del material. Con la arcilla FEBEX se han realizado los ensayos recogidos en este documento, aunque durante varios años se trabajó en el laboratorio con la muestra S-2, lo que, además de posibilitar una caracterización amplia de esta bentonita, sirvió de puesta a punto de los equipos y metodología necesarios para trabajar con materiales muy expansivos. Algunos ensayos básicos de caracterización termo-hidro-mecánica recogidos en este trabajo se han realizado sobre muestras de las bolsas de 10 kg tomadas en fábrica, aunque en la mayor parte se ha utilizado la muestra homogeneizada 70-IMA-3-4-0 (FEBEX). Puesto que se comprobó que todo el lote era muy homogéneo, no se ha hecho distinción entre unas y otras, y los resultados se han valorado conjuntamente.

MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA

Los caracterización del material se llevó a cabo en las primeras fases del Proyecto FEBEX, tanto con muestras procedentes de las bolsas de 10 kg, como con muestras procedentes de la muestra mezclada (FEBEX). La similitud de los resultados obtenidos en unas y otras, permite considerarlo un material homogéneo, del que se puede dar un único valor medio con sus correspondientes desviaciones. La preparación de las muestras para su caracterización mineralógica y química se realizó en el Proyecto de Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos, y los análisis en la División de Química Analítica del CIEMAT. Los métodos y resultados detallados se recogen en ENRESA (1998 y 2000) y se resumen a continuación. Estas determinaciones se realizaron también en los laboratorios del CSIC-Zaidín sobre alícuotas de la muestra homogénea. Aunque sus resultados no se presentan aquí, son muy similares a los de CIEMAT (ENRESA 2000).

La caracterización mineralógica se ha realizado por medio de difracción de rayos X sobre muestras secadas a 60 °C y molidas a tamaño de grano inferior a 63 µm. Los minerales mayoritarios se han determinado por el método del polvo en un difractómetro Philips PW 1370. La fracción menor de 2 µm, obtenida por suspensión, sedimentación y filtrado, se ha estudiado mediante agregados orientados secados al aire, solvatados con etilenglicol y calentados a 550 °C. Además, los minerales accesorios se identificaron mediante microscopio estereoscópico, se separaron, y se analizaron por medio de un microscopio electrónico de barrido acoplado a un sistema de análisis por energías dispersivas de rayos X (EDAX).

El análisis de 15 muestras diferentes ha permitido determinar la composición mineralógica semicuantitativa de la muestra FEBEX, cuyos valores medios y desviaciones estándar se muestran en la Tabla IV. Está formada fundamentalmente por esmectita, con pequeñas cantidades de plagioclasa, cuarzo y cristobalita. El feldespato potásico, la tridimita y la calcita aparecen como trazas (Tr).

Tabla IV: Composición mineralógica semicuantitativa de la muestra total (valores medios y desviaciones estándar en %)

Esmectita	Cuarzo	Plagioclasa	Cristobalita	Feldespato-K	Tridimita	Calcita
92±3	2±1	2±1	2±1	Tr	Tr	Tr

La Figura 23 muestra un diagrama de difracción de rayos X obtenido por el método del polvo típico de las muestras analizadas.

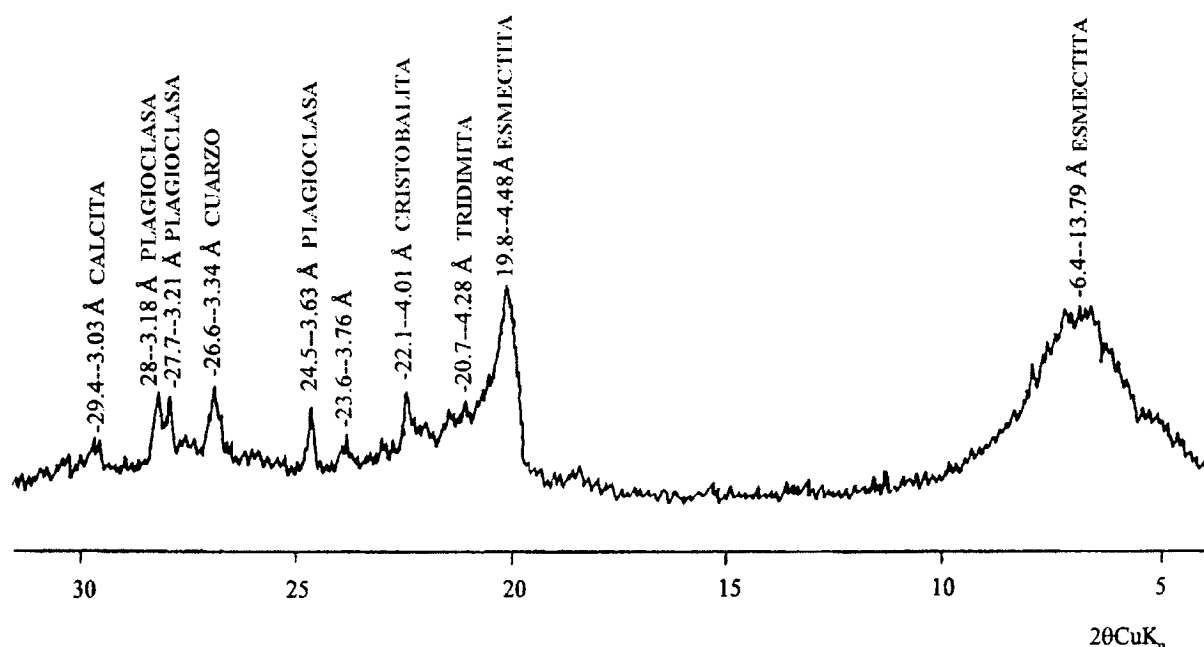


Figura 23: Diagrama de difracción de rayos X de la muestra total (ENRESA 1998)

Otros minerales presentes, identificados por microscopía electrónica de barrido, son micas (sericita, biotita, biotita cloritizada), piroxenos, anfíboles, pirita, óxidos (ilmenita, magnetita) y fosfatos (apatito, xenotima, monacita). Todos ellos proceden de la roca volcánica original y representan en conjunto una proporción inferior al 1 %. Los sulfatos, la halita, el carbono orgánico y las fases amorfas también aparecen, sin llegar a constituir entre todos más de un 1 %.

El análisis de los agregados orientados de la fracción menor de 2 μm indica que ésta se constituye casi exclusivamente por esmectita, ya que el pico a 14,5 Å del agregado orientado no tratado cambia a una reflexión muy fuerte a 16,9 Å cuando el agregado se trata con etilenglicol, y se colapsa a 10 Å cuando se calienta. La evolución de la posición de los picos en los difractogramas de rayos X de los agregados orientados en función de los diferentes tratamientos se muestra en la Figura 24, que incluye un conjunto de diagramas representativo de las muestras analizadas. El análisis de los diagramas solvatados con etilenglicol según el método de Moore & Reynolds (1989), atendiendo a la distancia entre los picos correspondientes a las reflexiones 001/002 y 002/003, indica que el esmectita es dioctaédrica, con una proporción de illita interestratificada entre el 10 y el 15 %.

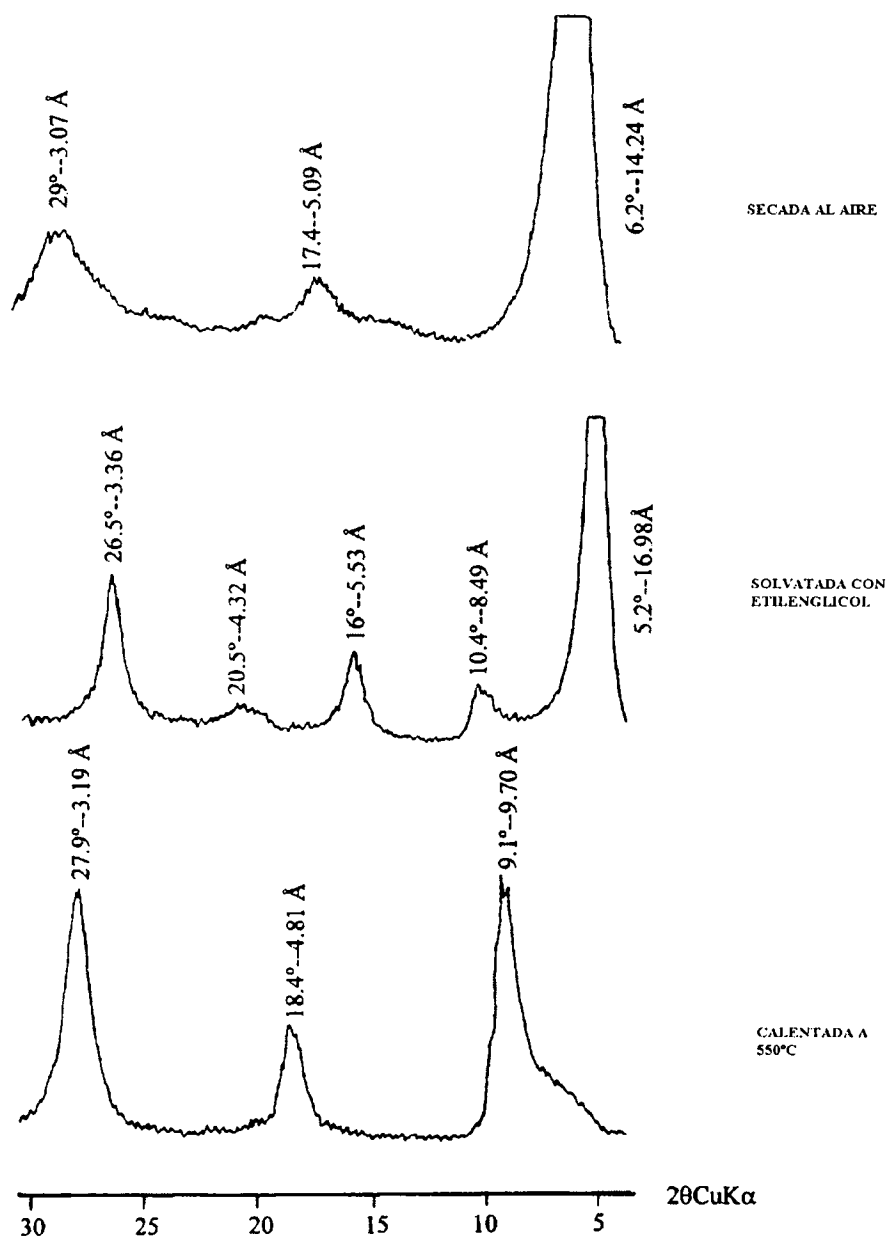


Figura 24: Diagramas de difracción de rayos X de los agregados orientados de la fracción menor de 2 μm (ENRESA 1998)

La fórmula estructural, determinada a partir del análisis químico de la fracción menor de 2 μm de dos muestras homoionizadas en calcio, indica que la esmectita es dioctaédrica aluminica y que la carga negativa se produce debido a sustituciones por magnesio en posiciones octaédricas, por lo que la esmectita es de tipo montmorillonita (Newman & Brown 1987).

El análisis del complejo de cambio catiónico de la arcilla, realizado mediante desplazamientos sucesivos con acetato amónico en 9 muestras diferentes, muestra que los cationes intercambiables mayoritarios son el calcio, el magnesio y el sodio, según se indica en la Tabla V, en la que aparece también el valor de la capacidad de cambio (CIC) determinado como suma de cationes.

Tabla V: Valores medios y desviaciones estándar del complejo de cambio (meq/100 g)

Ca²⁺	Mg²⁺	Na²⁺	K⁺	CIC
47±5	36±3	25±1	2,2±0,0	111±9

La composición química se ha analizado en 6 muestras previamente secadas a 60 °C y molidas a tamaño de grano inferior a 63 µm. La metodología de análisis seguida es la siguiente: espectrometría plasma de inducción acoplada para Al₂O₃, Fe₂O_{3 total}, Na₂O, MgO, MnO, TiO₂, CaO, As, Ba, Ce, Co, Cr, Cu, La, Ni, Sr, U, V, Y y Zn; fluorescencia de rayos-X para SiO₂; espectrometría de emisión atómica en llama para K₂O y Li; el carbono orgánico (CO₂org) y mineral (CO₂min), así como el azufre, fueron determinados usando un analizador elemental Leco CS-244; el H₂O⁻ y el H₂O⁺ se determinaron mediante ATG, usando un equipo Seiko TG/DTA 6300. Los valores medios y las desviaciones estándar obtenidos para cada elemento analizado se muestran en la Tabla VI.

Tabla VI: Composición química de la muestra total (valores medios y desviaciones estándar en %)

SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O_{3 total}	MgO	MnO	CaO	Na₂O	K₂O
58,7±1,9	18,0±0,7	3,1±0,1	4,2±0,1	0,04±0,00	1,8±0,1	1,3±0,1	1,1±0,1
TiO₂	P₂O₅	H₂O⁻	H₂O⁺	CO₂org	CO₂min	SO₂tot	F⁻
0,2±0,0	0,02±0,00	6,6±2,5	6,4±0,3	0,4±0,0	0,3±0,1	0,2±0,1	0,2±0,0

Entre los elementos traza encontrados en mayor proporción destacan el Cl (592±10 ppm), el Sr (220±21 ppm), el Ba (164±234 ppm), el Zn (65±4 ppm), el Ce (74±5 ppm) y el Li (54±3 ppm).

El contenido en sales solubles se ha determinado en extractos acuosos de relación sólido:líquido 1:4 de 10 muestras diferentes. En estos extractos, los cloruros se presentan en una concentración de 150±6 mg/L y los sulfatos en una concentración de 201±20 mg/L. Otros extractos realizados a diferentes relaciones sólido:líquido (Fernández et al. 1999)

muestran que esta concentración es inversamente proporcional a la dilución del extracto, y que el catión que mantiene el balance de carga es fundamentalmente el Na (246 ± 11 mg/L).

Finalmente, la superficie específica total de esta bentonita, determinada por el método de la higroscopicidad de Keeling (1961), es de 725 ± 47 m²/g.

AGUA UTILIZADA

En algunos de los ensayos que se presentarán en los capítulos siguientes, es necesaria la adición de agua a la bentonita antes del ensayo o bien su saturación en el transcurso de éste. Habitualmente se utiliza agua destilada, excepto en aquellos casos en que se ha querido comprobar precisamente la influencia del tipo de agua en el valor de la determinación realizada, o bien, se ha querido representar con mayor fidelidad las condiciones de la arcilla en el almacenamiento. En esos casos se han utilizado aguas de dos composiciones diferentes: agua granítica o agua salina. El agua granítica representa el agua que inicialmente entra en contacto con la barrera de arcilla en el almacenamiento, que proviene del medio geológico circundante. El agua salina pretende simular el agua en equilibrio con la bentonita una vez que ésta está saturada, que es a su vez, el agua que va a alcanzar las partes internas de la barrera. Como agua granítica se ha utilizado un agua comercial de origen granítico y composición bien definida y comprobada (FONTVELLA). Como agua salina se ha utilizado un agua sintética de composición similar al agua intersticial de la bentonita compactada a densidad seca de $1,65$ g/cm³ cuando está saturada. Esta agua intersticial se ha obtenido por compactación a alta presión (Fernández & Cuevas 1998), y la composición del agua sintetizada para utilizar en este trabajo está simplificada para reflejar sólo la concentración de los elementos mayores. La composición química de los dos tipos de agua se muestra en la Tabla VII:

Tabla VII: Composición química del agua utilizada en los ensayos

Elemento (mg/L)	Granítica	Salina
Cl ⁻	13,1	3550,0
SO ₄ ²⁻	14,4	1440,0
HCO ₃ ⁻	144,0	
Mg ²⁺	9,4	360,0
Ca ²⁺	44,9	400,8
Na ⁺	11,0	253,9
K ⁺	1,0	
pH	8,3	7,0

METODOLOGÍA

METODOLOGÍA

El trabajo experimental de esta Tesis ha sido llevado a cabo en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y en el de Materiales Subsaturados del Proyecto de Caracterización Hidrogeoquímica (PCHE) del CIEMAT (antes División de Técnicas Geológicas). El material empleado ha sido la arcilla FEBEX, cuyas características mineralógicas y químicas básicas se describen en la sección “MATERIAL”.

En este capítulo se describen los métodos utilizados para la caracterización termo-hidro-mecánica de la arcilla.

CONTROL DE CALIDAD

La magnitud del Proyecto FEBEX llevó a ENRESA a aplicarle un programa de garantía de calidad, con el objetivo de que el trabajo se realizara de una manera sistemática y planificada, disminuyendo así la probabilidad de ocurrencia de errores y disfuncionalidades. El trabajo de laboratorio se ha visto también condicionado por la aplicación de este programa, ya que está sujeto a control de ensayos. Los principales requisitos de este control son (ENRESA 1997):

- Elaboración de procedimientos específicos para cada tipo de ensayo, en el caso de que no se realizara de acuerdo a una Norma oficial (Normas UNE). Debido a las peculiaridades del material ensayado y de las técnicas utilizadas, éste ha sido el caso de la mayoría de los ensayos. Ha sido necesario elaborar gran número de Procedimientos, algunos de los cuales se recogen en los Anexos I a V, bien porque no existiera la Norma correspondiente, o porque la existente hubiera de ser modificada para adaptarla a las peculiares características del material.
- Conservación de los registros de ensayos. Ha sido necesario elaborar registros para cada tipo de ensayo conformes a los requisitos de control de calidad, y que por lo tanto incluyeran, además de los datos y fechas propios del ensayo, la referencia de

los equipos utilizados, el nombre del operador y la firma del responsable de la revisión, con la fecha correspondiente.

- Control de los equipos de inspección, medida y ensayo, que se han recogido en un inventario en el que se detallan las fechas y datos de las calibraciones de cada equipo, que han de realizarse con una periodicidad establecida. Además se recogen todas las incidencias, como averías, reparaciones o modificaciones. Este control se ha realizado según lo establecido en el Procedimiento CIEMAT IMA/X8/BI-X5 de “Control de equipos de medida y prueba”.
- Cada ensayo y cada muestra se referencia de acuerdo a claves preestablecidas que han de posibilitar la trazabilidad de todos ellos.

Todo ello lleva a la consecución de los siguientes objetivos:

- Mejor conocimiento del personal sobre el proceso, al tener todas sus actividades y funciones por escrito.
- Uniformidad de criterios para realizar un mismo trabajo, que da lugar a una menor variabilidad de los resultados debida al factor humano.
- Un control del proceso con mayor rigor y más eficaz, que permite detectar no conformidades y estudiar sus causas para implantar las acciones correctoras y preventivas que sean necesarias.

CARACTERIZACIÓN BÁSICA

Peso específico

Las partículas sólidas del suelo se caracterizan por su peso específico (γ_s), que se define como la relación entre el peso del sólido y el volumen ocupado por éste. El conocimiento del peso específico de las partículas es necesario para el cálculo de la porosidad y del índice de poros y, por tanto, del grado de saturación del suelo. En minerales como la montmorillonita el peso específico depende de las sustituciones isomorfas.

En el laboratorio se determina, con la ayuda de un picnómetro tarado, el peso específico relativo de las partículas sólidas (specific gravity of the grains, G_s), que se define como la relación entre el peso del sólido y el peso del mismo volumen de agua a 4 °C. Para obtener el peso específico se determina el peso del agua desplazada por una masa conocida de suelo seco.

Para este trabajo el peso específico se ha determinado sobre dos alícuotas de cada muestra, de entre 1,5 y 2,5 g, tomadas de una porción de 50 g de muestra seca en estufa. Se han utilizado picnómetros de 50 cm³, y se ha seguido básicamente el procedimiento de la Norma UNE 103-302 “Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo”. Se ha utilizado agua destilada para la suspensión del suelo y se han combinado las técnicas de ultrasonido y vacío para eliminar el aire de la suspensión.

Densidad y humedad gravimétrica

La humedad gravimétrica (w) de la muestra se define como la relación entre peso de agua y peso de suelo seco expresada en porcentaje. El peso de agua se obtiene por diferencia entre el peso inicial de la muestra y el peso de ésta después de secarla en estufa a 110 °C durante 24 horas. Para realizar esta determinación se ha seguido la Norma UNE 103-300-93 “Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa”.

La densidad seca (ρ_d) se define como la relación entre el peso de la muestra seca y el volumen ocupado por ésta antes del secado. En muestras de forma regular, el volumen se calcula a partir de las dimensiones, medidas con un calibre de precisión 0,01 mm. El volumen de muestras de forma irregular se determina por inmersión de éstas en un recipiente con mercurio y pesada del mercurio desalojado, según se establece en la Norma UNE 7045 “Determinación de la porosidad de un terreno” (Figura 25). Antes del ensayo la muestra ha de tallarse para adecuarla a las dimensiones del recipiente y su superficie ha de rasparse para evitar cualquier irregularidad, fisuras superficiales o huecos que permitan la entrada de mercurio en la muestra. Conociendo la densidad del mercurio, para la que se ha tomado un valor de 13,6 g/cm³, se calcula el volumen de mercurio desalojado, que equivale al de la muestra, puesto que el mercurio es un fluido no mojante que no es adsorbido por la muestra y la recubre perfectamente.



- Figura 25: Recipientes para la determinación de la densidad por inmersión en mercurio

Límites de Atterberg

La plasticidad es la propiedad que permite a un suelo deformarse sin fracturarse como respuesta a la aplicación de una presión. Los suelos plásticos se pueden remodelar cuando su humedad está en un intervalo determinado. Cuando la humedad del suelo está por encima de este intervalo los suelos se comportan como líquidos, mientras que para humedades por debajo del intervalo el suelo se convierte en un sólido frágil que puede llegar a romperse como respuesta a la presión aplicada.

Los límites líquido (w_L) y plástico (w_P), establecidos por Atterberg, definen y cuantifican la transición entre el estado líquido, plástico y frágil del comportamiento de un suelo. Concretamente se definen como la humedad gravimétrica a la que un suelo pasa del estado plástico al líquido (w_L), y la humedad a la que el suelo pasa del estado plástico al frágil (w_P), ambas expresadas en porcentaje. La diferencia numérica entre los límites líquido y plástico se define como índice de plasticidad (I_P). Por tanto, los límites se usan como indicadores sencillos de obtener del comportamiento mecánico del suelo.

Los límites se obtienen según determinaciones estándar establecidas inicialmente por Casagrande y posteriormente normalizadas.

El límite líquido se ha determinado según la Norma UNE 103-103-94: “Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande”. Básicamente consiste en determinar la cantidad de agua que ha de tener el suelo para que, una vez colocado en una cuchara normalizada que puede pivotar sobre un eje horizontal, un surco realizado en el suelo con un acanalador normalizado se cierre a lo largo de su fondo, tras haber dejado caer 25 veces la mencionada cuchara desde determinada altura sobre una superficie plana. El porcentaje de humedad del suelo en este momento es el límite líquido.

Para obtenerlo se amasan 150 g de suelo secado al aire que pase por el tamiz de 400 μm con agua destilada hasta obtener una pasta homogénea y se deja reposar durante 48 horas, porque, aunque la Norma establece 2 horas, se ha comprobado que en suelos expansivos el resultado es más representativo si se deja homogeneizar la pasta más tiempo. Se llena la cuchara con parte de la masa así preparada, se hace la acanaladura y se determina el número de golpes necesarios para que ésta se cierre. Si este número está comprendido entre 10 y 50, se toma una muestra del suelo próxima al surco y se determina su humedad por secado en estufa. Se repite la operación añadiendo agua destilada a la pasta o secándola con secador para que el número de golpes se encuentre en este intervalo. Normalmente cuatro determinaciones son suficientes. Se representa la relación lineal entre humedad y logaritmo del número de golpes, y el porcentaje de humedad correspondiente a 25 golpes da el valor del límite líquido.

El límite plástico se ha determinado según el método descrito en la Norma UNE 103-104-93 “Determinación del límite plástico de un suelo”, que consiste en obtener la humedad más baja con la que pueden formarse con un suelo cilindros de 3 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre los dedos de la mano y una superficie lisa, hasta que los cilindros empiecen a resquebrajarse. En este trabajo se ha utilizado para determinarlo la pasta sobrante de la determinación del límite líquido.

Los límites dan una idea del grado en que se encuentran ligadas las partículas del suelo; cuanto mayores sean las fuerzas interpartícula, más humedad será necesaria para separarlas y permitir que su comportamiento sea líquido y, por tanto, más elevado será su límite líquido. Por ello, el tamaño de las partículas, su superficie específica y la naturaleza de los minerales de arcilla tienen influencia sobre el comportamiento plástico de un suelo. En

general, el límite líquido está directamente correlacionado con la proporción de arcilla, con el porcentaje de sodio en el complejo de cambio y con la superficie específica.

Granulometría

Dado el intervalo de tamaños en el que están comprendidas las partículas del material analizado, se han utilizado consecutivamente dos técnicas diferentes para cuantificarlos, una vez dispersada la muestra. Los tamaños de partícula comprendidos entre 74 y 2 μm se han analizado siguiendo la Norma UNE 103-102 “Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro”, y los tamaños mayores se han cuantificado según la Norma UNE 103-101 “Análisis granulométrico de suelos por tamizado”, ambas con modificaciones para adaptarlas a suelos arcillosos de difícil dispersión.

El primer paso para la realización de las granulometrías es la dispersión de la muestra, que permite que todos los tamaños de partícula queden representados en el análisis. Ésta se ha realizado mezclando 20 g de muestra con 0,5 L de agua destilada y 5 g de hexametafosfato sódico, y agitando la mezcla periódicamente durante 48 horas. La cantidad de muestra empleada se ha elegido para que, por una parte, fuera representativa, y por otra, se adecuara al método del densímetro que se ha utilizado en la cuantificación, ya que, una cantidad excesiva de material aumenta las interacciones entre partículas y la viscosidad del fluido, lo que distorsionaría las medidas. Transcurrido este tiempo se aplican 5 sesiones de 5 minutos de ultrasonido a la suspensión, separadas entre sí otros 5 minutos. Durante todo el tiempo que dura el tratamiento de dispersión la muestra se mantiene en agitación mecánica.

Una vez dispersa la muestra, se vierte la suspensión en una probeta que se enrasa con agua destilada a 1 L y se introduce en un baño termostático a una temperatura fija y conocida entre 20 y 25 °C. Se introduce el densímetro en la probeta con la suspensión y se van tomando las lecturas de la profundidad del densímetro a los tiempos preestablecidos. Para cuantificar los diferentes intervalos de tamaño se aplica la ley de Stokes, que determina la velocidad de caída de una esfera sumergida en un fluido en función del peso específico de la esfera y del fluido, del diámetro de la esfera y de la viscosidad del fluido. La medida del densímetro permite conocer el peso específico medio de la zona ocupada por la parte

sumergida del densímetro, y a partir de éste se puede determinar la concentración de partículas de suelo a esa determinada profundidad para cada tiempo, que serán de un tamaño determinado según la ley de Stokes. Hay que señalar que los tamaños de partícula cuantificados según este método corresponden a diámetros equivalentes, es decir, al diámetro de una esfera del mismo peso específico que cayera a la misma velocidad en un fluido de la misma densidad y viscosidad. En el caso de partículas laminares, como las de las arcillas, el tamaño real puede diferir del equivalente.

El método de la sedimentación permite realizar la granulometría de las partículas entre 74 μm y 2 μm , aproximadamente. Algunos autores señalan que para tamaños superiores a 50-60 μm no es correcta la aplicación de la ley de Stokes, puesto que su sedimentación no se produce bajo las condiciones de flujo laminar para las que se define ésta. Por otra parte, las partículas de diámetro esférico equivalente inferior a 1 μm , pueden tener un movimiento browniano en cualquier dirección de una magnitud igual o superior a la sedimentación inducida por la gravedad, por lo que este tamaño constituye el límite inferior para el que este método es aplicable (Allen 1981).

Posteriormente, se vierte la suspensión sobre el tamiz de 74 μm y se lava la muestra. Con la parte retenida, una vez seca y pesada, se realiza el tamizado por una batería de tamices, para obtener la distribución granulométrica de las partículas más gruesas, que nunca son mayores de 5 mm, ya que ésta es la especificación con la que el material salió de fábrica. Se han utilizado los tamices de la serie ASTM de aperturas 2,00, 1,19, 0,59, 0,297, 0,149, y 0,074 mm. Una vez pesado el suelo retenido en cada tamiz, se calculan los porcentajes y se confecciona la curva granulométrica, ajustándola con los datos obtenidos mediante sedimentación.

ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA

La microestructura de un material está constituida por las partículas y huecos que no se pueden observar a simple vista. Su estudio consiste en la cuantificación y caracterización de la forma, disposición e interrelaciones entre ambos. Para ello se precisan técnicas especiales, en ocasiones indirectas. La importancia de los estudios microestructurales en

arcillas expansivas reside en que la disposición de las partículas de esmectita y la distancia y fuerzas entre ellas determinan la presión de hinchamiento, el agua móvil, el movimiento de gas, y la capacidad de transporte difusivo (Pusch et al. 1999). En este trabajo, el estudio de la microestructura se ha abordado como complemento de los estudios termo-hidro-mecánicos, y ha incluido la determinación de la distribución de porosidad mediante intrusión de mercurio, la cuantificación de la superficie específica externa mediante adsorción de nitrógeno, y el estudio al microscopio electrónico de barrido del material.

Porosimetría

El análisis porosimétrico de las muestras de arcilla compactada se ha realizado en un porosímetro mediante intrusión de mercurio.

El método de la intrusión de mercurio está basado en el principio físico de que un fluido no mojante, es decir, aquél cuyo ángulo de contacto es mayor que 90° para determinado sólido, no intruye espontáneamente los poros del sólido, pero sí lo hará si la presión aplicada es suficiente. La presión necesaria depende del ángulo de contacto, de la forma del poro y de la tensión superficial del líquido. Para poros de forma cilíndrica, la relación entre la presión y el diámetro mínimo de poro que puede ser intruido viene dada por la ecuación de Washburn:

$$P = \frac{-4 \gamma \cos \theta}{d}$$

en la que P es la presión requerida, γ es la tensión superficial del líquido, θ es el ángulo de contacto y d es el diámetro de poro. Los medios porosos contienen poros de formas irregulares, por lo que se considera que los poros intruidos bajo determinada presión tienen un diámetro cilíndrico equivalente al calculado mediante esta ecuación.

Este método tiene las siguientes limitaciones (Diamond 1970):

- Los poros no deben contener ningún fluido antes del comienzo del ensayo.
- Los poros completamente aislados, inaccesibles desde el exterior, no pueden cuantificarse.

- Los poros que sólo son accesibles a través de entradas de diámetro más pequeño sólo serán intruidos después de que se aplique suficiente presión para atravesar estos “cuellos”, por lo tanto, todo el volumen de estos poros se asignará, inexactamente, al tamaño más restringido.
- Aunque no haya poros aislados, no siempre se puede medir todo el volumen de poros, ya que esto depende de la capacidad de presión del aparato, y pueden quedar poros muy pequeños sin intruir.

En un trabajo para la IUPAC, Sing et al.(1985) clasifican los poros en tres grupos en función de su tamaño:

- Macroporos, aquéllos cuyo diámetro es superior a $0,05\ \mu\text{m}$.
- Mesoporos, con diámetros entre $0,002$ y $0,05\ \mu\text{m}$.
- Microporos, con diámetro inferior a $0,002\ \mu\text{m}$.

De acuerdo con esta clasificación, y teniendo en cuenta las presiones de inyección a las que trabajan los porosímetros convencionales, mediante la inyección de mercurio sólo se accede a la macroporosidad y a gran parte de la mesoporosidad.

El porosímetro utilizado es un Poresizer 9320 de Micromeritics (Figura 26), con un intervalo de presión de inyección de mercurio de $7\ \text{kPa}$ a $210\ \text{MPa}$, lo que permite medir diámetros de poro de entre 200 y $0,006\ \mu\text{m}$, dependiendo de las características del sólido estudiado (fundamentalmente del ángulo de contacto). El equipo consta de una unidad de preparación de la muestra, o de baja presión, y de otra de alta presión (Micromeritics 1985).

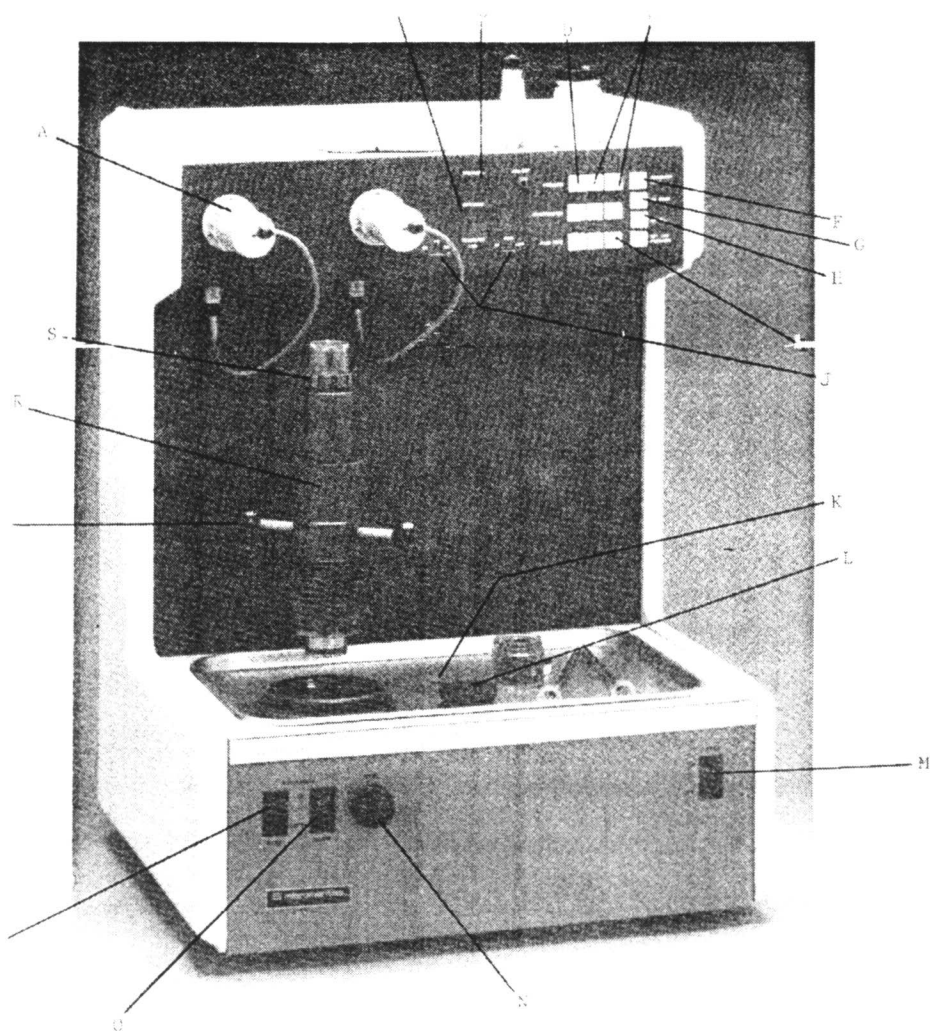


Figura 26: Poresizer 9320 de Micromeritics (A: unidad de baja presión, L: acceso al depósito de mercurio, M: interruptor de encendido, R: cámara de alta presión)

Antes de la realización del ensayo todo el agua de los poros de la muestra debe eliminarse, mediante un método que no produzca distorsión en la fábrica del material. Dependiendo de las características del material, el método de preparación varía desde el simple secado en estufa a 110 °C, para materiales no deformables, hasta la liofilización, para arcillas expansivas. Una vez seca la muestra se introduce en un penetrómetro, que está formado por un vástago de vidrio, por cuyo interior se desplaza el capilar de mercurio, soldado a la cámara que contiene la muestra (Figura 27). El penetrómetro ha de ser de las características apropiadas, es decir, su cámara ha de tener un tamaño lo más aproximado posible al de la muestra, y el diámetro del capilar debe estar en consonancia con la

cantidad de mercurio que se espera que intruya, lo que depende de la porosidad del material a ensayar.

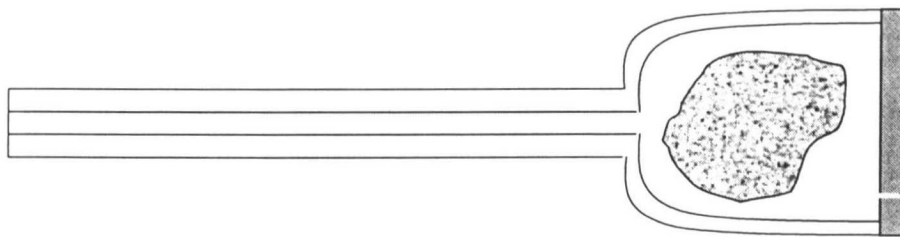


Figura 27: Esquema del penetrómetro con la muestra dentro de la cámara y el capilar y la cámara llenos de mercurio

El penetrómetro con la muestra se introduce en la unidad de baja presión, que permite el llenado de la cámara con mercurio mediante aumento de la presión desde las condiciones iniciales de vacío hasta 0,21 MPa (30 psia), con lo que se determina el volumen de poros de diámetro equivalente superior a 6 μm . Al final de esta etapa se despresuriza la unidad, se extrae el penetrómetro, y se pesa lleno de mercurio con la muestra. El conjunto pasa entonces a la unidad de alta presión, en la que se aplica un incremento de presión suficiente para que el mercurio intruya los poros mientras el aparato mide el volumen intruido. La medida del volumen se realiza gracias a la variación en la capacitancia eléctrica de un condensador coaxial cilíndrico formado por una cubierta exterior metálica alrededor del vástago del penetrómetro y por el capilar de mercurio interno. El nivel de mercurio en el capilar cae al llenarse los poros de la muestra, con lo que se produce una disminución lineal de la capacitancia eléctrica según va aumentando el volumen de poros. Los cambios de capacitancia se convierten en cambios de volumen multiplicando por el factor de calibración del penetrómetro. El proceso se repite a presiones progresivamente más altas hasta llegar al límite del aparato. Los incrementos de presión pueden ser definidos por el usuario previamente en función de las características del material. En el caso concreto de la bentonita FEBEX, los escalones de presión se han establecido, tras realizar varios ensayos de prueba, con el criterio de conseguir que todos los tamaños de poro significativos quedasen representados. Los escalones de presión (P) aplicados en este trabajo, junto con el diámetro de poro equivalente, se muestran en la Tabla VIII, en la que también aparecen los escalones de la fase de extrusión de mercurio. La extrusión se realiza, tras alcanzarse la presión más alta, por reducción progresiva de la presión de inyección. Este proceso está sometido a histéresis, por una parte porque el ángulo de

contacto entre el mercurio y las paredes del poro es diferente según que el fluido esté avanzando o retrocediendo sobre la superficie del sólido, y por otra, por la existencia de geometrías de poro irregulares con cuellos de botella que limitan la salida del mercurio. El tiempo fijado de estabilización una vez alcanzado cada escalón de presión es de 15 s.

Tabla VIII: Escalones de presión aplicados durante el ensayo de inyección de mercurio en la unidad de alta presión y diámetros equivalentes de poro según la ecuación de Washburn

INTRUSIÓN		EXTRUSIÓN	
P (MPa)	Diámetro (μm)	P (MPa)	Diámetro (μm)
0,2	7,368	172,4	0,0074
0,5	2,456	137,9	0,0092
1,4	0,921	103,4	0,012
2,4	0,526	68,9	0,018
3,4	0,368	51,7	0,025
5,2	0,246	34,5	0,037
6,9	0,184	17,2	0,074
10,3	0,123	6,9	0,184
17,2	0,074	3,4	0,368
34,5	0,037	0,7	1,842
51,7	0,025	0,3	3,684
68,9	0,018	0,1	13,157
86,2	0,015		
103,4	0,012		
120,7	0,011		
137,9	0,0092		
155,1	0,0082		
172,4	0,0074		
189,6	0,0067		
206,8	0,0061		

El volumen de mercurio intruido en cada paso se toma como el volumen total de poros con diámetros equivalentes más pequeños que los correspondientes a la presión precedente y más grandes que los correspondientes a la presión que causó el flujo. Añadiendo los

resultados de todos los pasos se obtiene una distribución acumulada de volumen en función del diámetro de poro. El equipo está conectado a un ordenador personal con el programa adecuado para el tratamiento de los datos con las correcciones y conversiones necesarias. Para la tensión superficial del mercurio se ha tomado un valor de 0,484 N/m y el ángulo de contacto se ha establecido en 130°.

Los datos obtenidos mediante la realización del ensayo permiten determinar, además de la distribución de tamaño equivalente de poro, la porosidad total de la muestra. Para ello se dispone de los siguientes datos:

- Peso de la muestra seca, determinado al comienzo del ensayo (W_s).
- Volumen del penetrómetro (V_p), determinado por calibración previa a la temperatura adecuada.
- Volumen de mercurio necesario para llenar el penetrómetro con la muestra dentro en la unidad de baja presión (V_{Hg}). Éste se obtiene a partir del peso de mercurio introducido y de su densidad.
- Volumen de la muestra (V), que se obtiene por diferencia del volumen del penetrómetro (V_p) y el volumen de mercurio V_{Hg} .
- Volumen de poros (V_h^*), que se obtiene a partir del mercurio intruido en el ensayo de alta presión. Se refiere sólo al volumen de poros interconectados y conectados con la superficie de la muestra con un diámetro mayor de 0,006 μm , por lo que se denota con * para diferenciarlo del volumen de poros total.
- Volumen del sólido (V_s^*) que se obtiene por diferencia del volumen de la muestra (V) y el volumen de poros (V_h^*). Al estar obtenido a partir de los datos de intrusión de mercurio, este volumen resulta mayor que el volumen de sólido real (V_s), ya que el volumen de poros obtenido puede estar minimizado, como ya se ha explicado.

A partir de estos datos se puede determinar el peso específico aparente del sólido (γ_s^*), que coincidiría con el peso específico del sólido si no hubiera poros cerrados o inaccesibles ni menores de 0,006 μm :

$$\gamma_s^* = \frac{W_s}{V_s^*} = \frac{W_s}{V - V_h^*}$$

Así mismo es posible determinar el índice de poros aparente de la muestra (e^*), mediante la expresión:

$$e^* = \frac{V_h^*}{V_s^*}$$

La comparación entre este índice de poros aparente (e^*) y el índice de poros calculado a partir del peso específico obtenido mediante picnómetro y de la densidad determinada mediante inmersión en mercurio según la Norma UNE 7045 (e), da el valor del porcentaje del total de poros que han sido intruidos por mercurio, y que por lo tanto, son mayores de 0,006 μm y están interconectados.

Para este trabajo se han utilizado muestras de la arcilla compactada de entre 8 y 15 g. Se acepta generalmente que cuando se trabaja con materiales arcillosos, para asegurarse de que los poros están vacíos de agua al comenzar el ensayo, la muestra ha de liofilizarse, ya que el secado en estufa conlleva retracciones en los materiales expansivos, y por lo tanto modificaciones considerables de la porosidad (Diamond 1970, Tuncer 1988, Romero 1999). Por el contrario, la liofilización somete a la muestra a unas condiciones de presión y temperatura que eliminan la tensión superficial entre la interfase aire/agua, evitando la retracción del sólido. Para preparar la muestra ésta se ha congelado rápidamente en un medio criogénico, nitrógeno líquido, cuya temperatura de evaporación es de -196°C , lo que impide el desarrollo de grandes cristales de hielo. Posteriormente se evacúa el agua en un liofilizador por sublimación a vacío a una temperatura suficientemente baja. El equipo de liofilización utilizado ha sido un Telstar con capacidad de vacío de 10 Pa a una temperatura de -40°C . Para preservar la efectividad de la técnica, las muestras empleadas deben tener un tamaño pequeño, con dimensiones inferiores a 10 mm. Algunos autores han señalado que la liofilización puede producir modificaciones en la distribución de porosidad, originando un aumento de la proporción de tamaño de poros grandes respecto al valor real (Lawrence et al. 1979).

Superficie específica externa

Se considera normalmente que las superficies externas de un material son las que rodean las partículas discretas o aglomerados, incluyendo todas las prominencias y la superficie de aquellas grietas que son más anchas que profundas. Las superficies internas son las paredes de todas las fisuras, poros y cavidades que son más profundas que anchas (Sing et al. 1985). La superficie específica externa –a diferencia de la superficie específica total (interna y externa)– es una propiedad que no depende sólo del tipo de material (de su mineralogía), sino que varía con la distribución de la porosidad y con la forma y tamaño de las partículas (su grado de agregación). Por este motivo, la superficie específica externa puede ser indicativa de variaciones en la microestructura y microfábrica del material, por lo que en este trabajo se ha determinado tras someter la arcilla a diferentes tratamientos.

Así mismo, el valor de superficie específica obtenido depende del tipo de adsorbente que se use para su determinación y de la preparación de la muestra, especialmente en materiales expansivos como las esmectitas. Por ejemplo, el uso de vapor de agua como adsorbente dará siempre valores más altos de superficie específica que el uso de gases de tipo nitrógeno, puesto que la primera penetra en los planes basales de las unidades de montmorillonita, mientras que los gases inertes como el nitrógeno, no. Por tanto, cuando se utilizan gases para determinar la superficie específica de materiales expansivos, sólo se cuantifica la superficie específica externa, mientras que el uso de moléculas polares como el agua dará el valor de la superficie específica total, interna más externa.

Uno de los métodos más empleados para determinar la superficie específica es la medida de adsorción de determinado gas sobre el material (Sing et al. 1985). La adsorción (fisisorción) es el enriquecimiento en uno o más componentes de una capa interfacial de un sólido. Ésta se produce cuando un gas adsorbible se pone en contacto con la superficie de un sólido (el adsorbente). Cuando la adsorción es monocapa, todas las moléculas del gas están en contacto con la capa superficial del sólido. En este contexto, la superficie específica (a_s) se define como la superficie del sólido que puede ser cubierta por una monocapa completa de adsorbato por unidad de masa. Para calcularla es necesario conocer la cantidad de gas adsorbido y el área ocupada por una molécula de adsorbato en la monocapa.

La desorción es el mecanismo inverso a la adsorción, es decir, aquél por el cual la cantidad de gas adsorbido en el sólido disminuye. La relación, a temperatura constante, entre la cantidad de gas adsorbido y su presión de equilibrio se conoce como isoterma de adsorción. El análisis de isotermas de adsorción-desorción de vapores sobre sólidos permite calcular la superficie específica y la forma en que ésta está distribuida en el sólido, así como la forma, tamaño y distribución de la porosidad.

El método más utilizado para el cálculo de la superficie específica es el conocido método de BET (Brunauer et al. 1938), cuya ecuación describe la adsorción de un gas sobre una superficie sólida:

$$\frac{X}{V(1-X)} = \frac{1}{V_M C_{BET}} + \frac{C_{BET} - 1}{V_M C_{BET}} X$$

A partir de la representación gráfica del volumen adsorbido (V) frente a la presión relativa ($X=P/P_0$, donde P es la presión en el momento de la medida, y P_0 es la presión de saturación del gas, es decir, la presión de vapor del gas licuado a la temperatura a la que tiene lugar la adsorción), y tomando el intervalo de presión relativa en que esta relación es lineal, se determina el volumen de monocapa V_M (la pendiente) y un parámetro C_{BET} (la intercepción), relacionado con el calor de adsorción del sistema adsorbato-adsorbente; suponiendo que no existe límite al número de capas adsorbidas. La capacidad monocapa V_M es la cantidad de gas, expresada como un volumen en condiciones estándar de presión y temperatura, necesaria para cubrir la superficie con una única monocapa.

La superficie específica (a_s) se calcula a partir de la capacidad monocapa V_M según la siguiente expresión:

$$a_s = \frac{V_M \times a_m \times N}{V_0 \times W}$$

en la que a_m es el área de la sección de una molécula de adsorbato situada en la monocapa, N es el número de Avogadro, V_0 es el volumen de un mol de gas ideal en condiciones estándar de presión y temperatura y W es el peso de muestra.

De forma simplificada puede determinarse un único punto de la isoterma de adsorción, que quede dentro del intervalo lineal del gráfico BET. En este caso, y haciendo las suposiciones necesarias, la ecuación anterior queda convertida en:

$$a_s = \frac{V \times a_m \times N \times \left(1 - \frac{P}{P_0}\right)}{V_0 \times W}$$

en la que V es el volumen de gas adsorbido en condiciones estándar de presión y temperatura. Este es el método utilizado para este trabajo.

El ensayo se ha llevado a cabo en un equipo Flowsorb II 2300 de Micromeritics (Figura 28), mediante adsorción de nitrógeno a partir de una mezcla de nitrógeno y helio de relación 30/70 a la temperatura de un baño de nitrógeno líquido (-196 °C). Para el cálculo de la superficie específica se han utilizado los siguientes valores:

- Número de Avogadro (N): $6,023 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol.
- Volumen molar de un gas en condiciones estándar de presión y temperatura (V_0): $22414 \text{ cm}^3/\text{mol}$.
- Area de la superficie sólida ocupada por una molécula de nitrógeno adsorbida (a_m): $16,2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$.
- P es la presión atmosférica multiplicada por 0,30, puesto que la mezcla tiene un 30 % de nitrógeno y la adsorción se produce a presión atmosférica. P_0 es la presión de saturación del nitrógeno líquido, que suele ser algo mayor que la presión atmosférica.

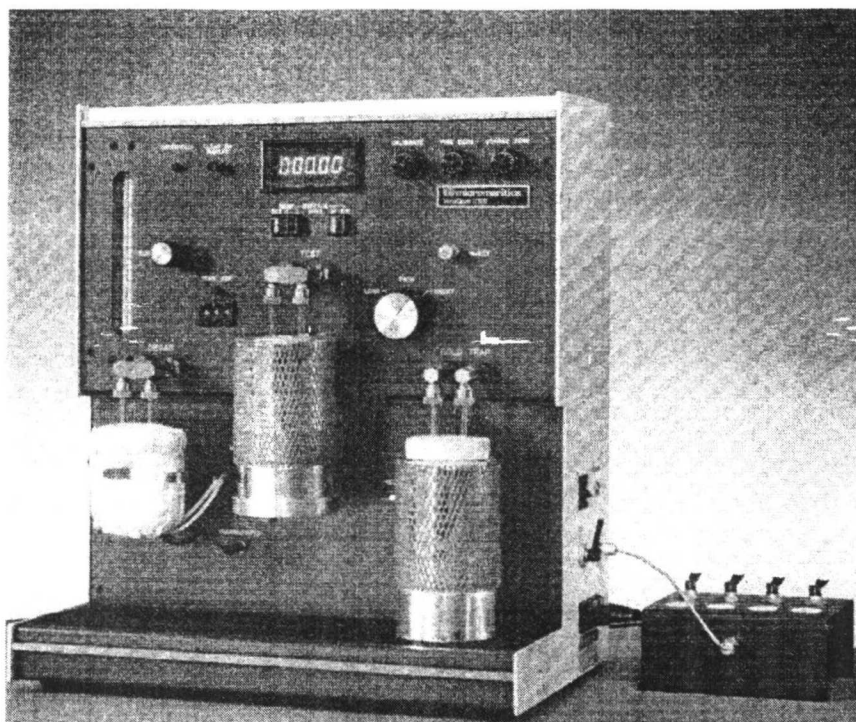


Figura 28: Equipo para medida de la superficie específica FlowSorb II 2300 de Micromeritics

Para cada determinación se han utilizado 5 g de muestra molida y seca en estufa a 110 °C durante 24 horas, con el fin de que sus poros no contengan agua que impida la entrada del gas. Una vez introducida la muestra en el aparato, se desgasifica a 60 °C durante 15 minutos antes de realizar la medida. La determinación se realiza sobre dos alícuotas, y el valor que se da para cada muestra es la media de las dos determinaciones. En caso de haber discrepancia importante entre ambas se realiza una tercera medida.

Microscopía electrónica de barrido

Como complemento a los ensayos realizados y buscando una mayor comprensión de las particularidades del comportamiento de la bentonita FEBEX, se ha realizado un estudio del material al microscopio electrónico de barrido en el Laboratorio de Microscopía Electrónica del Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Politécnica de Cataluña. Se han utilizado dos equipos de diferentes características técnicas que permiten analizar el material bajo diferentes puntos de vista. Estos son:

- Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6400, con el que se pueden obtener imágenes con electrones secundarios y retrodispersados (Figura 29). Tiene acoplado un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X LINK LZ_5 que permite el análisis cualitativo y cuantitativo de elementos ligeros a partir del boro. Puesto que las muestras estudiadas no son conductoras, es necesario recubrirlas de oro para obtener buenas imágenes al microscopio, para lo que se utiliza un metalizador BALZERS SCD 004, que, a un vacío de $5 \cdot 10^{-2}$ Torr, ioniza el metal depositándolo en una capa de 300 a 400 Å sobre la muestra. A parte de esta metalización a vacío, las muestras no han sufrido con anterioridad a su introducción en el microscopio ningún otro tipo de secado o tratamiento.

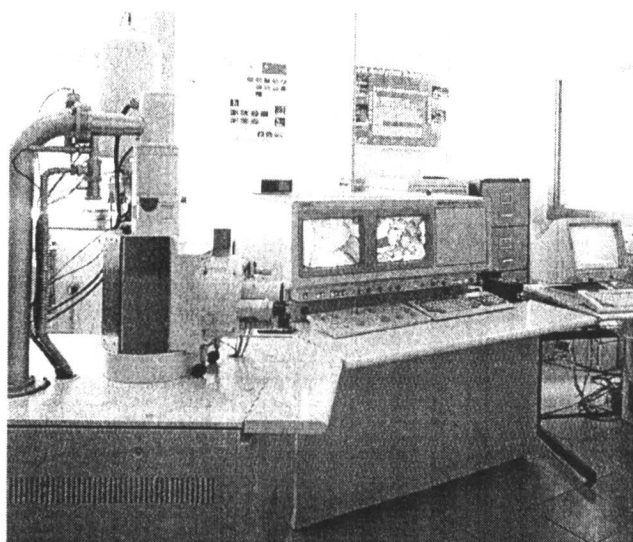


Figura 29: Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6400

- Microscopio electrónico de barrido ambiental ELECTROSCAN 2020, con el que se obtienen imágenes mediante electrones secundarios de muestras con cualquier humedad, ya que es la propia agua del material la que actúa como película conductora (Figura 30). Esto permite trabajar directamente con la muestra sin manipular. Posee además un portamuestras de enfriamiento termoeléctrico de efecto Peltier que permite variar la temperatura 20 °C por encima o por debajo de la ambiente. Esta variación de temperatura se combina con variaciones en la presión de gas de la cámara, que se consiguen inyectando vapor de agua, pudiéndose llegar hasta 50 Torr. La variación conjunta de presión y temperatura, o de una de ellas, permite trabajar a diferentes condiciones de humedad relativa según el diagrama de

fase del agua, manteniendo la misma muestra en la cámara del microscopio. Para este estudio se ha trabajado a una presión de entre 5 y 10 Torr, manteniendo la temperatura constante a 12 °C.



Figura 30: Microscopio electrónico de barrido ambiental ELECTROSCAN 2020

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La medida de conductividad hidráulica de materiales arcillosos expansivos de baja permeabilidad no puede realizarse en perméametros convencionales, puesto que en éstos, la muestra suele colocarse, enfundada en una camisa de látex, dentro de una celda triaxial de metacrilato, en la que no es posible aplicar presión confinante suficiente para contrarrestar el hinchamiento de la muestra al saturar, con lo que no se pueden controlar sus dimensiones. Por otra parte, los elevados gradientes hidráulicos necesarios para que el agua que circula dentro de una probeta poco permeable sea medible, no pueden obtenerse en equipos convencionales, en los que las presiones suelen aplicarse mediante columnas de mercurio.

Por ello, se ha desarrollado en CIEMAT un método de medida de la conductividad hidráulica de suelos expansivos, a través de la determinación del coeficiente de permeabilidad (k_w), que evita estos inconvenientes (Villar & Rivas 1994). La novedad del método respecto a la medida convencional de la permeabilidad en perméametro de carga fija con célula triaxial, consiste en la posibilidad de utilizarlo en materiales expansivos que modificarían su volumen al saturar y en la de aplicar diferentes gradientes hidráulicos.

El principio teórico del método es el de un perméametro de carga fija. Básicamente consiste en la medida en función del tiempo del volumen de agua que atraviesa una probeta de material, confinada en una celda rígida que impide su deformación, a la que se impone un gradiente hidráulico constante entre la parte superior y la inferior. Para ello se aplica una carga hidráulica, es decir, una diferencia de potencial, entre la parte superior e inferior de la muestra previamente saturada. Gracias a la saturación completa y al hinchamiento asociado se garantiza un contacto perfecto con las paredes de la celda, que evita que el agua circule entre la muestra y éstas. Al mismo tiempo, se mide el flujo de agua que atraviesa la probeta en función del tiempo.

El sistema de medida está constituido por los siguientes elementos (Figura 31 y Figura 32):

- Celda de acero inoxidable con entrada y salida de agua en la que se confina la muestra. Las dimensiones de la muestra son $19,63 \text{ cm}^2$ de superficie y $2,50 \text{ cm}$ de altura, lo que supone un volumen de $49,10 \text{ cm}^3$.
- Dos sistemas de presión, para la presión en cola y para la presión de inyección. Para la presión en cola se utiliza un sistema de depósitos de mercurio autocompensables, equipado con una instalación para agua desaireada; y para la presión de inyección se utilizan mantenedores de presión constante electrohidráulicos de la casa Wykeham Farrance (para presiones de hasta $3,5 \text{ MPa}$), o bombas de pistón (del tipo utilizado para cromatografía líquida de alta precisión, HPLC) de la casa Gilson. Estas bombas permiten aplicar presiones de hasta 42 MPa , aunque para la medida de la permeabilidad nunca se sobrepasan los $7,2 \text{ MPa}$.
- Aparato electrónico de medida de cambio de volumen con precisión $0,001 \text{ cm}^3$.
- Sistema de adquisición de datos.

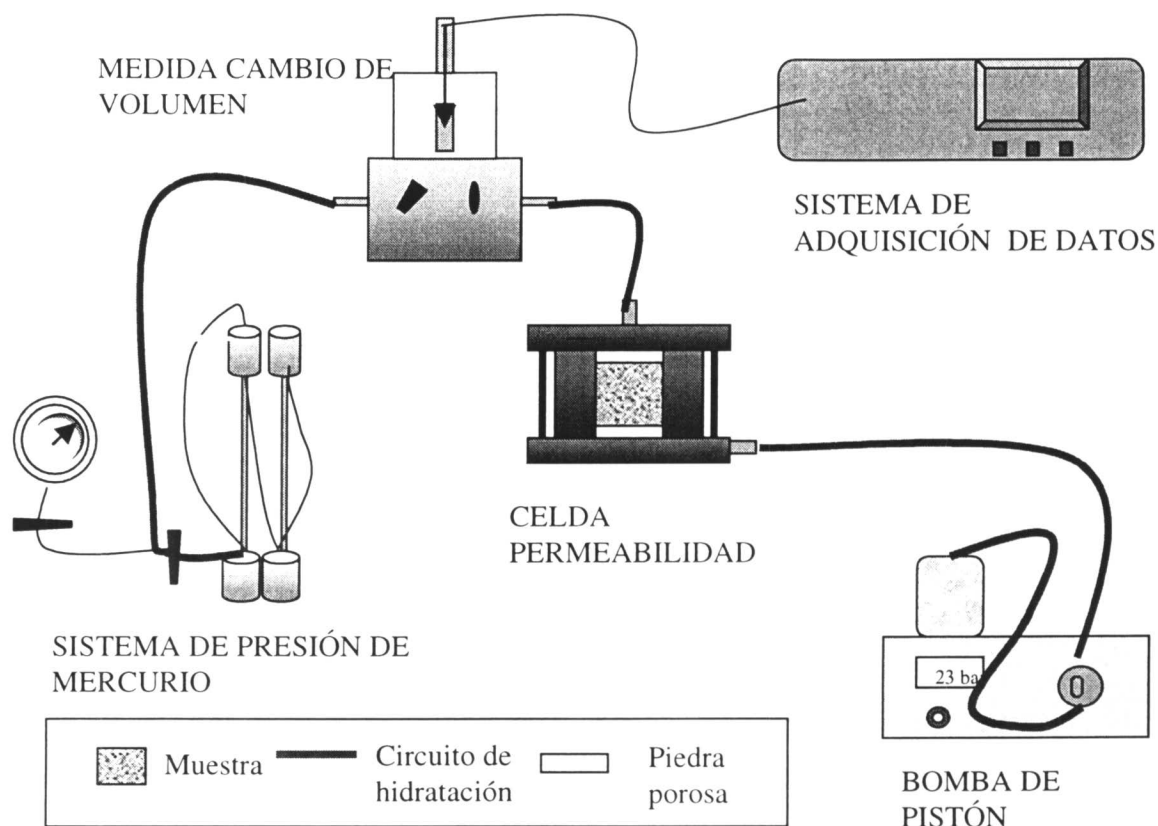


Figura 31: Representación esquemática del dispositivo para medida de permeabilidad en materiales expansivos

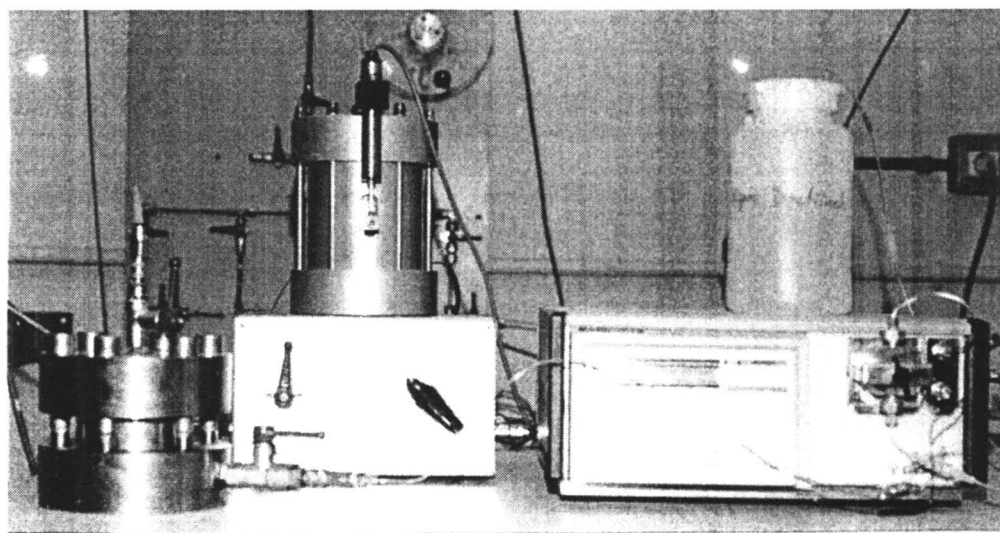


Figura 32: Montaje para la medida de la permeabilidad: celda, aparato de cambio de volumen y bomba de pistón (de izquierda a derecha)

Las muestras remoldeadas se preparan compactando la arcilla directamente en el interior del anillo de la celda, mediante aplicación de una presión uniaxial, hasta la densidad

requerida. En el caso de muestras inalteradas es necesario adecuarlas al diámetro del anillo de la celda, tallándolas con el anillo cortador correspondiente, procurando no modificar ni su humedad ni su densidad.

En contacto con la parte superior e inferior de la muestra se colocan sendos papeles de filtro y, a continuación, piedras porosas. Una vez ajustadas las tapas de la celda, se procede a la saturación de la muestra a 0,6 MPa por ambos extremos. De esta manera se hidrata la muestra hasta saturación completa durante el tiempo necesario, que depende del tipo de muestra y de su densidad y humedad inicial, y que suele fijarse en un mínimo de dos semanas.

Una vez saturada la muestra se aplica el gradiente hidráulico, mediante el incremento de la presión de inyección en la parte inferior de la celda (P_i), mientras se mantiene una presión en cola de 0,6 MPa (P_c), para favorecer la disipación de aire en el sistema. De esta manera se obtiene una carga hidráulica, que corresponde a la diferencia entre la presión inferior y superior ($\Delta P = P_i - P_c$). El gradiente hidráulico, supuesto lineal, es la relación entre la carga hidráulica y la longitud de la probeta. Entre la toma superior de la celda y el sistema de presión en cola, se instala un aparato de medida de cambio de volumen, que se conecta a un sistema de adquisición de datos, que registra periódicamente el volumen de agua que atraviesa la muestra. El ensayo se ha de prolongar el tiempo suficiente para permitir comprobar que el volumen de agua que atraviesa la probeta tiene una relación lineal y estable con el tiempo, lo que suele suponer de 4 a 7 días. Si no se observa flujo de agua será necesario incrementar la carga hidráulica mediante el aumento de la presión de inyección.

Una vez alcanzado el caudal constante, se determina el volumen de agua que atraviesa la muestra (ΔV , cm³) en un intervalo de tiempo dado (Δt , s). La permeabilidad k_w (cm/s) se calcula aplicando la ley de Darcy sobre flujo en medios porosos, lo que supone considerar sólo el movimiento macroscópico del agua, que el flujo es laminar y que el sólido poroso es macroscópicamente isótropo (Jiménez & Justo 1971):

$$k_w = \frac{\Delta V \times l}{A \times \Delta t \times \Delta P}$$

donde ΔP es la carga hidráulica en cm de agua, A es la superficie de la celda ($19,63 \text{ cm}^2$) y l la altura de la probeta ($2,50 \text{ cm}$).

Para cada muestra se ha realizado la determinación de permeabilidad bajo diferentes gradientes hidráulicos, aunque, en principio, los valores obtenidos, si el flujo es efectivamente darciniano, han de ser independientes de este factor. En concreto, los valores de carga hidráulica aplicados en los ensayos se encuentran entre $0,7 \text{ MPa}$, para densidades secas de $1,30 \text{ g/cm}^3$, y $6,6 \text{ MPa}$ para densidades secas de $1,84 \text{ g/cm}^3$. Teniendo en cuenta que la altura de la pastilla es de $2,5 \text{ cm}$, el gradiente hidráulico promedio ha sido de 15200 m/m .

Al finalizar el ensayo se determina la humedad final de la muestra.

La permeabilidad es función de la densidad del material y del tipo de agua utilizado. Así mismo, la temperatura influye en el valor de la permeabilidad, por lo que debe mantenerse constante durante el ensayo. Las determinaciones registradas en este trabajo están realizadas a temperatura ambiente (entre 20 y $25 \text{ }^\circ\text{C}$). El procedimiento detallado de la realización del ensayo se puede encontrar en el Anexo I.

PERMEABILIDAD AL GAS

Los mecanismos que originan el movimiento de gas en un suelo son: la difusión, que da lugar a un movimiento neto de gas de una zona de mayor concentración a otra de menor; y el flujo másico o advección, por el que toda la masa gaseosa se mueve como respuesta a un gradiente de presión.

En las condiciones normales de un suelo, el mecanismo principal de movimiento del gas es la difusión, ya que la presión total del gas es la misma en todos los poros del suelo. La mayoría del movimiento del gas se produce en los poros rellenos de aire, porque la difusión en la fase gaseosa es casi cuatro órdenes de magnitud mayor que a través del agua. Sin embargo, en la barrera arcillosa de un almacenamiento se producen gradientes de temperatura, generación de gas, y cambios en el volumen de poros accesibles debidos a las

variaciones de humedad, que dan lugar a gradientes de presión que provocan el flujo advectivo del gas.

Los flujos advectivos de agua y gas (\mathbf{q}_w , \mathbf{q}_g) siguen la ley de Darcy, con permeabilidades relativas (k_{rw} , k_{rg}) que dependen del grado de saturación en líquido:

$$\mathbf{q}_w = -\frac{\mathbf{k}_i k_{rw}}{\mu_w} (\nabla P_w - \rho_w \mathbf{g}) = -\mathbf{k}_w k_{rw} \left(\frac{\nabla P_w}{\rho_w g} + \mathbf{i}_z \right)$$

$$\mathbf{q}_g = -\frac{\mathbf{k}_i k_{rg}}{\mu_g} (\nabla P_g - \rho_g \mathbf{g}) = -\mathbf{k}_{g0} k_{rg} \left(\frac{\nabla P_g}{\rho_g g} + \mathbf{i}_z \right)$$

donde k_i es el tensor de permeabilidad intrínseca, P_w , P_g , ρ_w , ρ_g , μ_w y μ_g son la presión, la densidad y la viscosidad dinámica de las fases agua y gas (w y g), g es la gravedad, \mathbf{i}_z es el vector unitario en la dirección del eje z, k_w es la conductividad hidráulica en condiciones saturadas, y k_{g0} la permeabilidad al gas del suelo seco.

Idealmente, la permeabilidad intrínseca (k_i) sólo depende de la estructura del suelo, y tiene el mismo valor para flujo de gas y de agua. Este valor se asocia generalmente con el diámetro de poro y con la distribución de tamaños de poro. Cuantitativamente, el efecto del tamaño de poro y de la porosidad total en la permeabilidad intrínseca se puede evaluar mediante la ecuación de Poiseuille:

$$k_i = \frac{1}{2} \frac{n^3}{(1-n)^2} \left(\frac{D_h}{\alpha} \right)^2$$

donde n es la porosidad, D_h es el diámetro de grano efectivo, y α es un coeficiente de forma de grano.

Consecuentemente, puesto que la porosidad rellena de aire varía con la humedad y el grado de compactación del suelo, ambos factores tienen un efecto decisivo en el intercambio de agua y gas en el suelo. Por otra parte, el flujo de gas requiere la continuidad de la fase gaseosa. Cuando los poros están rellenos de agua, el aire se ve bloqueado, por lo que la permeabilidad al aire disminuye al aumentar la humedad. Matyas (1967) considera que para grados de saturación superiores al 90 %, la fase gaseosa queda ocluida, por lo que el

movimiento del gas se reduce a la difusión a través del agua de los poros. Por el contrario, para grados de saturación menores del 85 %, la fase gaseosa se hace continua, comenzando el flujo de gas (Corey 1957).

Los métodos de medida de la permeabilidad al gas se clasifican en estacionarios y no estacionarios. Dentro de estos últimos se encuadra el método empleado en este trabajo, cuyo principio básico fue desarrollado por Kirkham (1946). Básicamente consiste en presurizar un depósito y liberar esta presión a la atmósfera a través de la columna de suelo cuya permeabilidad se quiere conocer. A partir del registro de la disminución de presión en el depósito en función del tiempo, se puede calcular la permeabilidad. Para ello ha de suponerse que mientras la presión cae en el depósito, la distribución de presión en la muestra de suelo es la misma que si esta presión instantánea se hubiera mantenido en el depósito por mucho tiempo.

Se ha realizado la medida de la permeabilidad al gas en probetas de arcilla compactadas utilizando el montaje que se muestra en la Figura 33 y Figura 34. La muestra cilíndrica de arcilla compactada se introduce en una celda triaxial confinada entre dos piedras porosas y enfundada en dos camisas de látex, entre las que se aplica grasa de vacío para evitar la pérdida de gas a través de ellas. Se aplica una presión de 1,6 MPa a la cámara de la celda triaxial, con el objeto de asegurar la perfecta adherencia de la camisa de látex a las paredes de la muestra. La toma de la parte inferior de la muestra se conecta a un depósito estanco de volumen conocido, en el que previamente se introduce gas nitrógeno a una presión ligeramente superior a la atmosférica. El depósito está instrumentado con un captador de presión, conectado a un sistema de adquisición de datos, que registra la presión de fluido en su interior. La toma de la parte superior de la muestra se deja abierta a la atmósfera. El ensayo consiste en dejar salir el aire del depósito a la atmósfera a través de la probeta, mientras se mide la disminución de presión en el depósito en función del tiempo. El ensayo debe realizarse a temperatura constante.

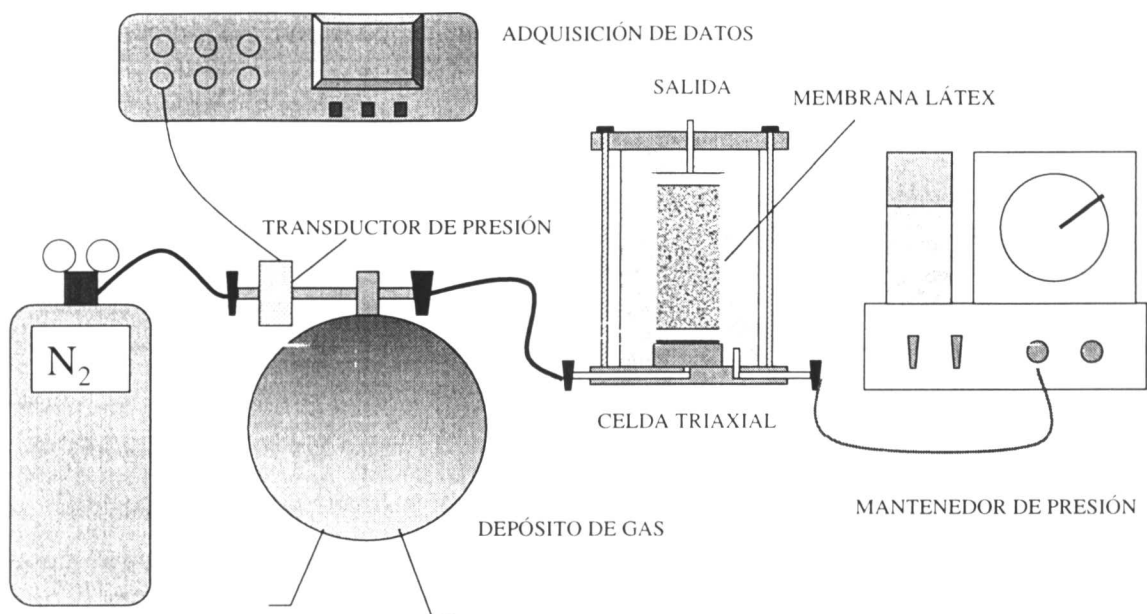


Figura 33: Representación esquemática del sistema de medida de permeabilidad al gas

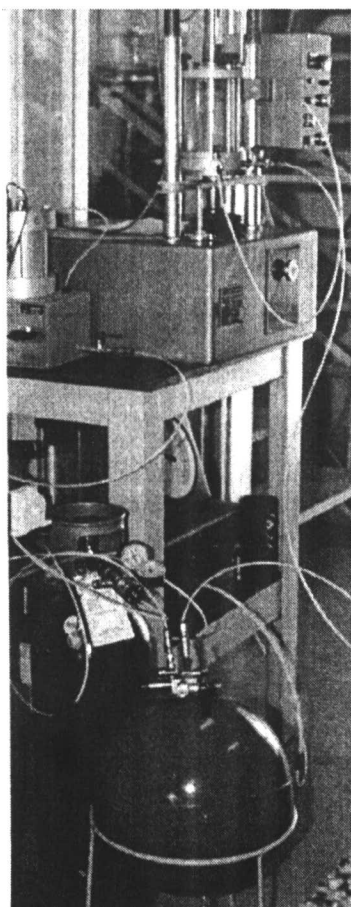


Figura 34: Montaje para la medida de la permeabilidad al gas: celda triaxial con probeta, sistema de presión lateral, depósito de gas y botella de nitrógeno

La permeabilidad al gas se calcula según la siguiente ecuación (Yoshimi & Osterberg 1963):

$$k_g = 2,3 \times \frac{V \times l \times \rho_g \times g}{A \times \left(P_{atm} + \frac{P_0}{4} \right)} \times \frac{-\text{Log}_{10} \left(\frac{P(t)}{P_0} \right)}{t - t_0}$$

donde k_g es la permeabilidad al gas (m/s), V el volumen del depósito (m^3), l la altura de la muestra (m), A el área de dicha muestra (m^2), ρ_g la densidad del gas (kg/m^3), P_{atm} la presión atmosférica (N/m^2), P_0 el exceso de presión sobre la presión atmosférica en el tiempo t_0 (s) y $P(t)$ el exceso sobre la presión atmosférica en el depósito en el tiempo t . Esta ecuación ha sido deducida de un modo análogo a la expresión de la permeabilidad al agua cuando se utiliza un permeámetro de carga variable, planteando la ecuación de la continuidad del aire teniendo en cuenta su compresibilidad (Lloret 1982). Para derivarla se ha asumido que las presiones iniciales P_0 son relativamente pequeñas frente a la presión atmosférica.

El volumen del depósito utilizado es $2,21 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, el espesor nominal de la muestra es 8,00 cm y la sección $11,40 \text{ cm}^2$. El gas utilizado en todos los ensayos ha sido nitrógeno, para el que se ha tomado una densidad de 0,04 mol/L (Lide 1995). La presión del depósito al inicio de los ensayos se fija en valores próximos a 1,03 bar, ya que, para preservar constantes las propiedades del gas durante el ensayo, no se le debe someter a presiones elevadas, con lo que se evita también alterar el estado del suelo.

Teniendo en cuenta la viscosidad dinámica del nitrógeno (μ_g , $1,79 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$), se obtiene la siguiente relación entre la permeabilidad al gas (k_g , m/s) y el producto de la permeabilidad intrínseca medida con gas nitrógeno (k_{ig} , m^2) y la permeabilidad relativa al gas (k_{rg}):

$$k_g = k_{g0} \times k_{rg} = \frac{\rho \times g}{\mu_g} \times k_{ig} \times k_{rg} = 6,2 \cdot 10^5 \times k_{ig} \times k_{rg}$$

Las probetas utilizadas para la medida se han fabricado por compactación uniaxial en un molde apropiado de la arcilla a diferentes densidades (Figura 35). Se ha utilizado la arcilla con su humedad higroscópica y con humedad añadida. En este último caso, tras mezclar la

arcilla con la cantidad de agua necesaria para llegar a la humedad deseada, se ha dejado estabilizar durante varios días en bolsas de plástico cerradas, para facilitar una distribución uniforme de la humedad. Para fabricar probetas con humedad inferior a la higroscópica, la arcilla se ha secado en estufa durante diferentes períodos cortos de tiempo (entre 1 y 6 h) antes de la compactación. Al acabar el ensayo se miden las dimensiones de la probeta con un calibre que aprecia 0,01 mm y se determina su humedad (Norma UNE 103-300-93). Con estos datos se calcula la densidad seca de la arcilla para la que se realizó la medida.

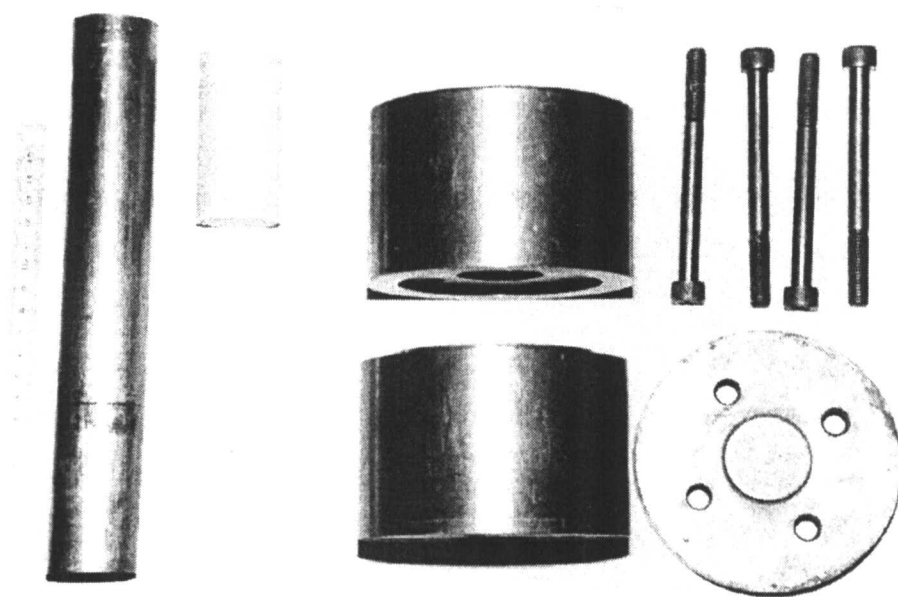


Figura 35: Molde para fabricación de probetas para medida de la permeabilidad al gas

ENSAYOS EN EDÓMETRO

En este capítulo se describe la metodología para la realización de dos ensayos, el de presión de hinchamiento y el de saturación bajo carga, que se realizan en el mismo equipo, el edómetro, por lo que tienen fases de montaje y desmontaje comunes. Por este motivo, el aparato y algunas operaciones sólo se describen en la primera sección. Los procedimientos detallados de ambos ensayos se recogen en los Anexos II y III.

Presión de hinchamiento

Los suelos que contienen minerales arcillosos de estructura laminar o expansiva se caracterizan por su gran deformabilidad al hidratarse, ya que las partículas incorporan el agua en su estructura, aumentando la distancia entre interláminas, es decir, en la dirección del eje c (cf. sección “CARACTERÍSTICAS DE LAS ESMECTITAS”).

Si el material se satura a volumen constante y su deformación es impedida, las partículas ejercerán una presión sobre la estructura confinante que se denomina presión de hinchamiento, y que alcanza su valor de equilibrio cuando la muestra está completamente saturada y a succión nula.

El ensayo de presión de hinchamiento permite determinar la presión de hinchamiento en equilibrio ejercida por una muestra al saturarse completamente a volumen constante. Para su realización se han utilizado edómetros y celdas edométricas convencionales, en las que la superficie del anillo portamuestras se ha reducido, para poder contrarrestar las altas presiones esperadas. La Figura 36 muestra una sección esquemática de una celda edométrica. La muestra se confina en un anillo portamuestras que impide su deformación lateral, y entre dos placas porosas en las superficies inferior y superior. El pistón de la celda, solidario con la piedra porosa superior, está en contacto con el vástago de carga, cuyo desplazamiento, o bien el del mismo pistón, se puede medir con exactitud por medio de un comparador. La muestra se puede cargar a través del vástago mediante el sistema de palancas de la bancada edométrica en que está alojada la celda (Figura 37). La capacidad de carga del equipo (140 kg), su brazo de la palanca (7,85 ó 10) y la sección de la muestra ($9,98$ ó $11,40 \text{ cm}^2$) determinan la presión máxima aplicable. Estas celdas no permiten medir directamente la presión ejercida por la muestra, sino determinarla de forma indirecta a partir de la carga que es necesario aplicar para que el volumen de la muestra se mantenga constante durante la saturación.

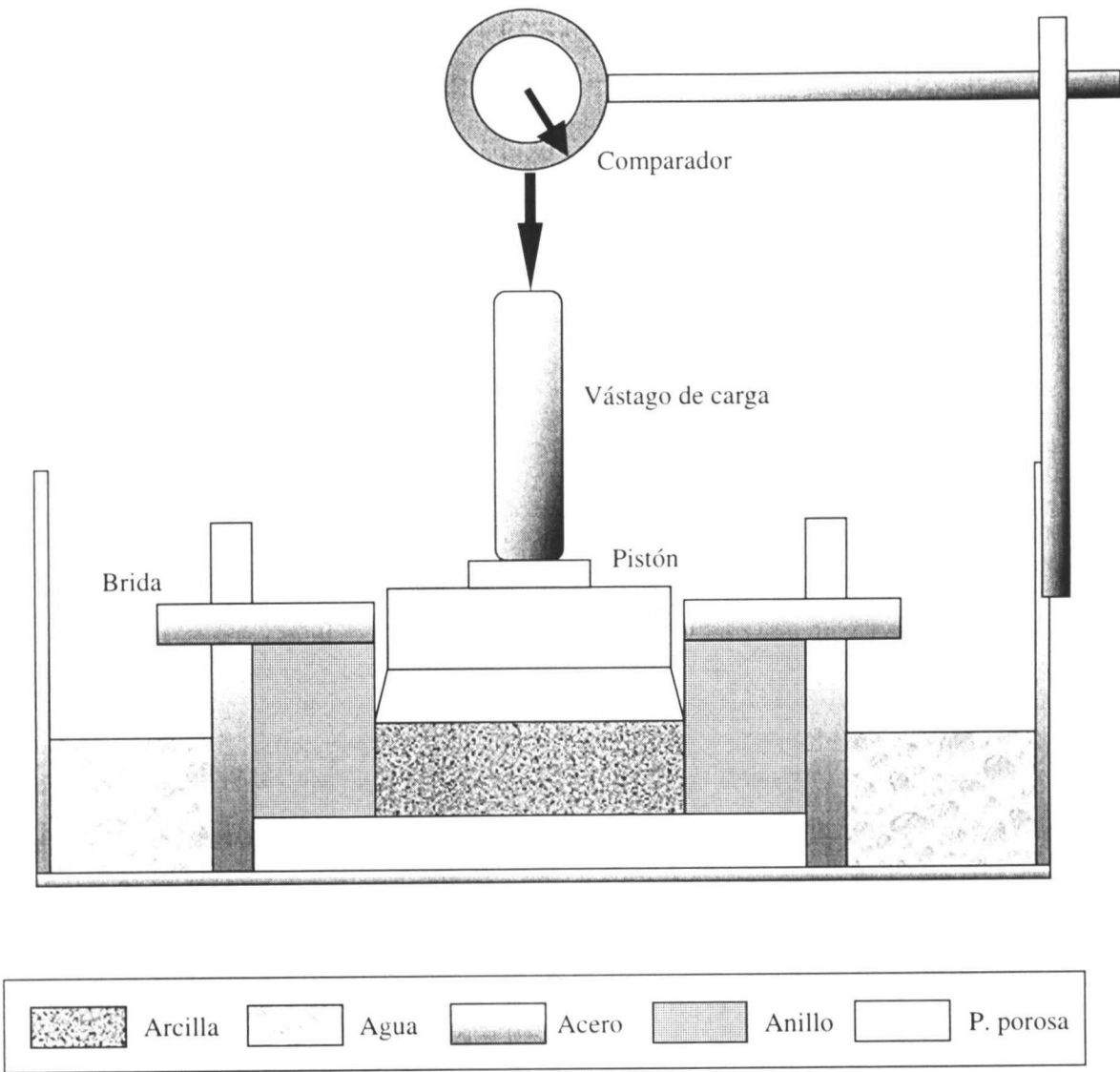


Figura 36: Sección esquemática de una celda edométrica

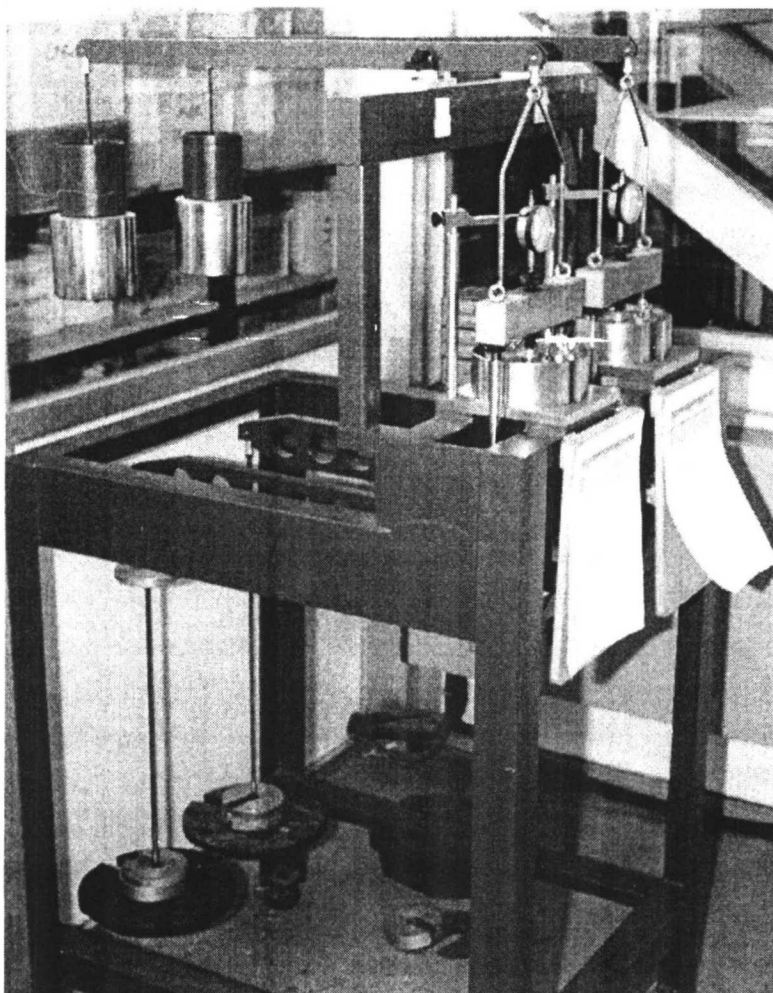


Figura 37: Bancada edométrica de dos puestos con las celdas instaladas

En la mayoría de los casos, las muestras se han preparado mediante compactación uniaxial de la arcilla directamente en los anillos del edómetro. El peso de muestra necesario para fabricar la pastilla se calcula teniendo en cuenta el volumen del molde de compactación, y la densidad y humedad deseadas. La altura inicial de la pastilla (1,20 cm) es siempre la mitad de la altura del anillo del edómetro (2,40 cm), para evitar que, si se produce gran hinchamiento, la muestra desborde fuera del anillo y para asegurar que el pistón esté siempre bien guiado. Se han utilizado anillos de diámetro 3,81 y 4,95 cm. En algunos casos, claramente indicados, en lugar de compactarse la muestra en el anillo del edómetro, se han utilizado pastillas talladas a partir de bloques de mayor tamaño previamente compactados. Para ello se han utilizado anillos talladores de las dimensiones apropiadas, y una vez obtenida la muestra se ha introducido en el anillo del edómetro.

La muestra contenida en el anillo portamuestras se coloca en la celda del edómetro y se cubre la piedra porosa inferior de agua destilada (salvo que se indique otro tipo de agua), de manera que la muestra comience a saturarse de abajo a arriba, permitiéndose que el aire de los poros pueda ir escapando por la parte superior.

Una vez montada la celda en el edómetro, e inundada la piedra porosa inferior, se observa el desplazamiento registrado por el comparador a medida que la muestra se satura, y se va evitando el hinchamiento de la muestra por medio de la aplicación de cargas. Se ha de procurar que la lectura del comparador no se aleje mucho de la inicial (manteniéndola en un margen de $\pm 0,005$ cm), evitando de esta forma tanto el hinchamiento como la consolidación de la muestra. El ensayo se considera finalizado cuando no se observe deformación durante al menos 24 horas.

Aplicando a la carga necesaria para estabilizar la deformación el factor del brazo de palanca y dividiéndola por la superficie de la pastilla, se tiene la presión de hinchamiento de la muestra para la densidad y humedad a las que se realizó el ensayo.

Los ensayos se han realizado a la temperatura del laboratorio, que oscila entre 20 y 25 °C. La descripción detallada del procedimiento se puede encontrar en el Anexo II.

Hinchamiento bajo carga

Los mecanismos descritos que provocan que el suelo ejerza presión de hinchamiento al hidratarse a volumen constante, son también responsables de la deformabilidad del suelo cuando éste se hidrata bajo una carga inferior a su presión de hinchamiento (*cf.* sección “CARACTERÍSTICAS DE LAS ESMECTITAS”). En este caso, la capacidad de deformación dependerá, además de los factores ya enumerados (tipo de mineral arcilloso, densidad seca, humedad, orientación de las partículas, tipo y cantidad de cationes adsorbidos, composición del agua de saturación, historial de tensiones del suelo, temperatura), de la carga concreta bajo la que se realice el ensayo, siendo aquélla tanto mayor cuánto menor sea ésta.

La capacidad de deformación de un suelo, o hinchamiento al saturar bajo carga, se determina en el mismo equipo edométrico descrito en la sección anterior utilizado para la

realización del ensayo de presión de hinchamiento (Figura 36). La preparación de la muestra se realiza también siguiendo las mismas pautas, y se han utilizado muestras del mismo tamaño: altura 1,20 cm y diámetro 4,95 ó 3,81 cm.

El montaje de la muestra en la celda edométrica es análogo al que se realiza para el ensayo de presión de hinchamiento, comenzando las diferencias entre ambas determinaciones en el momento de iniciarse el ensayo propiamente dicho. En el caso del ensayo de saturación bajo carga, se aplica inicialmente a la muestra la carga deseada mediante el brazo de palanca de la bancada edométrica y, a continuación, se inunda la celda, de manera que se produzca la saturación de la muestra a través de la placa porosa inferior. La muestra comienza a hinchar de acuerdo a sus características y a la carga a la que está sometida. Se va registrando la deformación indicada por el comparador a intervalos de tiempo progresivamente mayores, hasta que ésta se estabiliza durante al menos 24 horas, con lo que se considera finalizado el ensayo.

La relación entre el incremento de altura final experimentado por la muestra en equilibrio con la carga aplicada, y su altura inicial, da el valor de la deformación del material al saturarse bajo la carga a la que se realizó el ensayo. El resultado final es por tanto el porcentaje de deformación de una muestra de densidad seca y humedad iniciales dadas al saturarse bajo una carga determinada.

Los ensayos se han realizado a la temperatura del laboratorio, que oscila entre 20 y 25 °C. La descripción detallada del procedimiento se puede encontrar en el Anexo III.

ENSAYOS CON SUCCIÓN CONTROLADA

Se ha visto que la medida de propiedades de la bentonita saturada en el laboratorio presenta ciertas peculiaridades que hacen necesario modificar las técnicas y equipos clásicos a la hora de trabajar con materiales expansivos, debido fundamentalmente a su extraordinaria capacidad de hinchamiento, su deformabilidad y su baja permeabilidad. Otra característica, ligada a las anteriores, que condiciona su comportamiento y por lo tanto las técnicas a utilizar en su estudio, es su gran avidez por el agua y su elevada

capacidad de retenerla, es decir, su elevada succión. La magnitud de la succión de las esmectitas cuando están alejadas del estado saturado es tal, que no puede ser medida directamente por métodos convencionales como los tensiómetros o psicrómetros, sino sólo mediante sensores capacitivos en muestras muy grandes (*cf.* sección “Medida y control de la succión”). Cuando se quiere estudiar su comportamiento no saturado sin perder el conocimiento de sus variables de estado, incluida la succión, es necesario recurrir a la alternativa de imponer la succión en lugar de medirla, es decir, someter la muestra a una succión determinada y conocida que condiciona su grado de humedad, mientras que el resto de variables (esfuerzos, deformaciones) se modifican y miden de la forma tradicional. Las principales técnicas y desarrollos experimentales para el estudio de materiales en condiciones subsaturadas, así como los principios teóricos, se han descrito en la sección “Suelos no saturados”. En los ensayos recogidos en este trabajo se han utilizado dos técnicas diferentes para imponer la succión: la traslación de ejes y la imposición de una humedad relativa.

El principio de traslación de ejes consiste en modificar la succión mediante el aumento de presión en la fase gaseosa (Richards 1941, Hilf 1956). La muestra se coloca en una celda en contacto con agua a presión atmosférica a través de una membrana permeable al agua pero no al gas (tipo Visking de la casa Medicell Int. Ltd. o Spectra/Por de la casa Spectrum). Estas membranas, de celulosa regenerada, tienen una naturaleza amorfa de tipo gel, y un diámetro de poro de 2,4 nm, por lo que son flexibles y adecuadas para trabajos de filtración y ósmosis. Inmediatamente se aumenta la presión en la celda inyectando gas a la presión deseada, lo que aumenta la presión de aire en los poros de la muestra. Esta nueva situación fuerza a la muestra a intercambiar agua a través de la membrana hasta alcanzar de nuevo el equilibrio. Puesto que los cambios de succión capilar vienen dados por la diferencia entre la presión de aire en los poros (u_a) y la presión de agua (u_w), al aplicar una presión de aire a la muestra, se introduce un aumento de u_a , mientras que u_w permanece igual a la presión atmosférica. De esta manera, la succión capilar varía la misma cantidad que la presión de gas. La membrana permite el paso de iones, por lo que mediante este método no se controla la succión osmótica. Debido a las limitaciones mecánicas de la celda, sólo es posible aplicar succiones matriciales menores de 14 MPa. Como gas se ha utilizado nitrógeno industrial.

El método de imposición de una humedad relativa (HR) se basa en que ésta condiciona la presión de agua y gas en los poros (u_w y u_a). Esta humedad puede imponerse mediante disoluciones de ácido sulfúrico (aunque cualquier otra disolución de actividad de agua conocida podría utilizarse). La muestra intercambia agua con la atmósfera hasta que alcanza el equilibrio termodinámico con la presión de vapor de la disolución, por lo que se modifica la succión total. La succión en los poros de la muestra (s , en MPa) se relaciona con la actividad de agua de la disolución ($a_w=HR/100$) mediante la ley de Kelvin:

$$s = -10^{-6} \frac{R \times T}{V_w} \ln\left(\frac{HR}{100}\right)$$

donde R es la constante universal de los gases (8,3143 J/mol·K), T la temperatura absoluta y V_w , el volumen molar del agua ($1,80 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$).

La relación entre la actividad de la disolución (a_w) y el porcentaje en peso de ácido sulfúrico utilizado para prepararla (p) se refleja en tablas experimentales (Gmitro & Vermeulen 1964). Esta relación depende de la temperatura, por lo que ésta ha de permanecer constante durante los ensayos. Para 20 °C la relación puede ajustarse a una ecuación polinómica de cuarto grado:

$$a_w = 7 \cdot 10^{-8} \times p^4 - 6 \cdot 10^{-6} \times p^3 - 0,0001 \times p^2 - 0,0019 \times p + 0,9927$$

La transferencia de agua entre la arcilla y la atmósfera puede hacer variar la densidad de la disolución, por lo que ésta ha de comprobarse antes y después de la estabilización, lo que se realiza con picnómetros. Existe una relación experimental entre el peso específico (o densidad) de la disolución, (d , g/cm³) y el porcentaje en peso de sulfúrico de la disolución (p , que a su vez depende de la actividad, a_w), dependiente de la temperatura (Lide 1995). Para 20 °C esta relación se ajusta a una ecuación exponencial:

$$p = 145,8984 \times \ln(d) + 0,9807$$

Con este método pueden obtenerse succiones totales de entre 3 y 500 MPa. Dada la influencia de la temperatura sobre la actividad de las disoluciones, ésta debe mantenerse constante y conocida durante todo el ensayo.

Determinación de la relación succión/humedad a volumen libre

La relación entre succión y humedad de una muestra informa sobre la capacidad de retención de agua que ésta tiene. El procedimiento para establecer esta relación consiste básicamente en estabilizar la muestra a una succión dada y determinar su humedad una vez alcanzado el equilibrio. El ensayo se repite para muestras del mismo material pero utilizando succiones diferentes, con el fin de establecer la relación succión/humedad en un intervalo amplio de succiones.

Además de obtenerse la relación succión/humedad, sometiendo diferentes muestras de un mismo material a succiones diferentes, puede obtenerse también la curva de retención de ese mismo material, que es la evolución de la relación succión/humedad que experimenta una misma muestra al ser sometida a trayectorias de aumento o disminución de la succión (hidratación o secado). Ambos ensayos se realizan según una metodología similar.

La relación succión/humedad puede estar condicionada por la densidad y la humedad inicial de la muestra, por el tipo de trayectoria seguida en la modificación de succión – secado o humectación– y por el estado tensional. La temperatura del ensayo también tiene su influencia, por lo que ha de permanecer constante y conocida.

En esta sección se describe un procedimiento de determinación de la relación succión/humedad en el que la muestra no está confinada durante la aplicación de la succión. Esto supone que, por tratarse de materiales expansivos, el volumen de la muestra varía durante el ensayo, según si toma o cede agua. Esto conlleva una variación de densidad seca de la muestra que no se puede controlar, ya que la muestra hincha o retrae debido a los cambios de humedad: al aumentar la humedad la muestra hincha, aumentando su volumen y disminuyendo por tanto su densidad seca; y al disminuir la humedad de la muestra, se produce su retracción y consiguientemente un aumento de densidad. Sin embargo, la medida cuidadosa de las dimensiones de la muestra tras alcanzarse el equilibrio, permite conocer para cada succión cuál es la densidad seca al final de la estabilización y, por tanto, el grado de saturación.

El ensayo comienza con la fabricación de pastillas con la densidad y humedad deseadas, mediante compactación uniaxial de la arcilla. El diámetro resultante es 3,03 cm y la altura

1,23 cm. Cuando se trabaja con muestras grandes compactas que se desea queden inalteradas, se tallan con ayuda de un anillo cortador de dimensiones adecuadas. El tamaño de la pastilla condiciona el tiempo de estabilización, por lo que el tamaño elegido resulta del compromiso entre el tiempo de ensayo y la representatividad de la muestra.

Se han utilizado dos técnicas diferentes para controlar la succión: para succiones matriciales de entre 0,1 y 2,0 MPa, las celdas de membrana, y para succiones totales de entre 3,3 y 500,0 MPa, los desecadores con disoluciones de ácido sulfúrico. Cuando se está determinado la curva de retención, la misma muestra, una vez estabilizada a una determinada succión, pasa a una celda o desecador en los que la succión impuesta es superior o inferior, donde de nuevo permanece el tiempo necesario para estabilización de su humedad. Este proceso se repite sucesivamente hasta obtener una curva de secado o de hidratación con todos los puntos intermedios que se consideren necesarios.

Puesto que la metodología de ensayo es propia para cada técnica –celdas de membrana o desecadores– ambas se describen por separado. El procedimiento detallado se encuentra en el Anexo IV. Las operaciones que se describen a continuación deben realizarse en un recinto con temperatura controlada y regulada, que en nuestro caso se ha fijado en 20°C.

Ensayo en celdas de membrana

Las celdas de membrana han sido fabricadas por la empresa Mecánica Científica (Getafe) según un diseño original de Esteban (1990) realizado en el CEDEX. Están constituidas por una base plana y un cuerpo cilíndrico que deja un espacio en su interior de 49 cm³ (Figura 38). Tapa y cuerpo, ambos de acero inoxidable, se ajustan mediante tornillos y se asegura la estanqueidad del conjunto con una junta tórica. El cuerpo dispone de una toma de gas con llave y de un manómetro que permite conocer la presión en el interior de la celda. La parte inferior de la celda lleva encastrada una piedra porosa por debajo de la cual hay tomas de agua conectadas a un depósito a presión atmosférica. Entre la muestra y la piedra porosa se coloca una membrana semipermeable de celulosa regenerada que permite la circulación de agua pero no del gas hacia el exterior de la celda. Entre la celda y el depósito se coloca una bomba peristáltica o centrífuga que facilite la evacuación de las burbujas de gas que llegan a difundir a través de la membrana, de manera que se garantice

la continuidad de la fase líquida. El montaje completo se muestra en la Figura 39, en la que se aprecia la bomba y el depósito de agua. Aunque las celdas pueden soportar presiones de gas de hasta 14 MPa, sólo se han utilizado para succiones iguales o inferiores a 2 MPa. Como gas se ha empleado nitrógeno industrial.

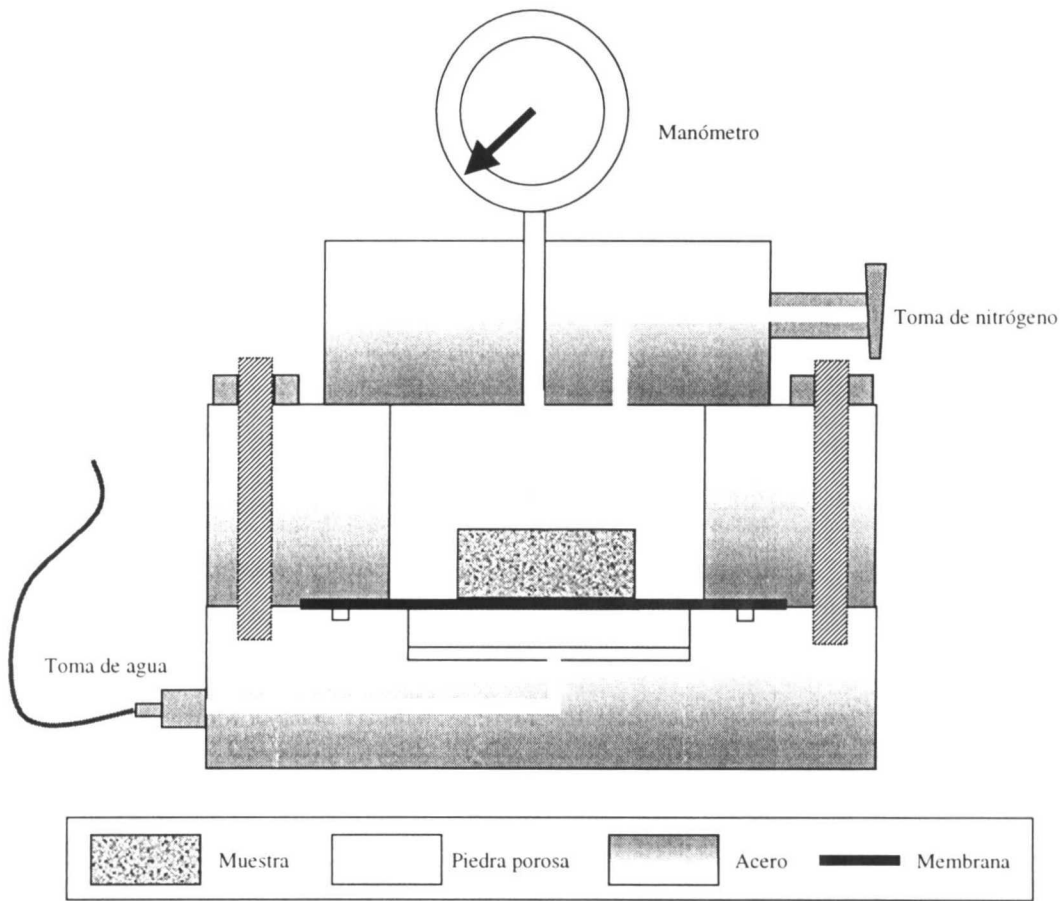


Figura 38: Sección esquemática de una celda de membrana

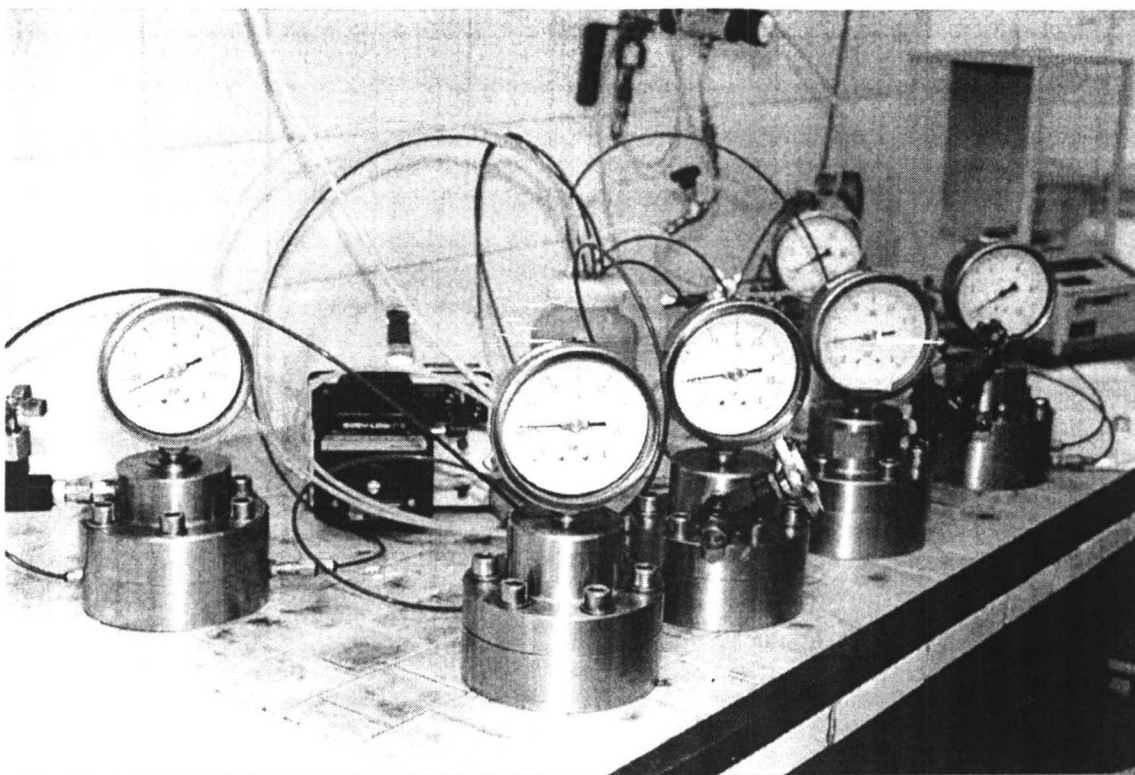


Figura 39: Celdas de membrana conectadas al depósito de agua a través de una bomba peristáltica

La pastilla se coloca sobre la membrana (una pastilla por celda), se cierra la celda, se incrementa la presión y se conectan las tomas de agua. Periódicamente se comprueba la variación de humedad sufrida por la muestra, para lo que se desmonta la celda, se pesa la pastilla y se vuelve a introducir en la celda con la misma presión. Una vez conseguida la estabilización, es decir, cuando no se observen variaciones de humedad superiores al 0,1 %, el proceso se da por finalizado. Para la bentonita estudiada en este trabajo, el tiempo de estabilización está entre 20 y 30 días.

Si se está determinando una curva de retención, la muestra pasará a otro escalón de succión tras hacer la última pesada y medirla para determinar su densidad seca. Si por el contrario, se está determinando un punto singular de la relación succión/humedad o bien es el final del ensayo de determinación de la curva de retención, la muestra se mide y se seca en estufa a 110 °C durante 24 horas, para comprobación de densidad y humedad finales.

Ensayo en desecadores

Para imponer succiones superiores a 3 MPa se ha utilizado el control de la humedad relativa de la atmósfera que rodea la muestra, introduciendo las muestras en desecadores con disolución de ácido sulfúrico de porcentajes en peso entre 6 y 72 %.

Una vez fabricadas las pastillas se introducen en el desecador con la disolución adecuada, se tapa y se hace el vacío, para acelerar el intercambio de humedad entre la muestra y la atmósfera del desecador. En cada desecador se pueden introducir varias pastillas. En los desecadores de 20 cm de diámetro empleados en este trabajo se introducen entre 3 y 9 pastillas (Figura 40). Periódicamente se comprueba la variación de humedad sufrida por la muestra, para lo que se quita el vacío y se abre el desecador, se pesan las pastillas y se vuelven a introducir en el desecador con la misma disolución (la periodicidad de las pesadas puede variar en función de las necesidades del ensayo o de las características de las muestras). Una vez conseguida la estabilización, es decir, cuando no se observen variaciones de humedad superiores al 0,1 %, el proceso se da por finalizado. Para la bentonita estudiada en este trabajo, el tiempo de estabilización está alrededor de 30 días, siempre algo mayor que el necesario para estabilización en celdas de membrana, ya que en este último caso la transferencia de humedad se realiza en fase líquida y en los desecadores en fase vapor.

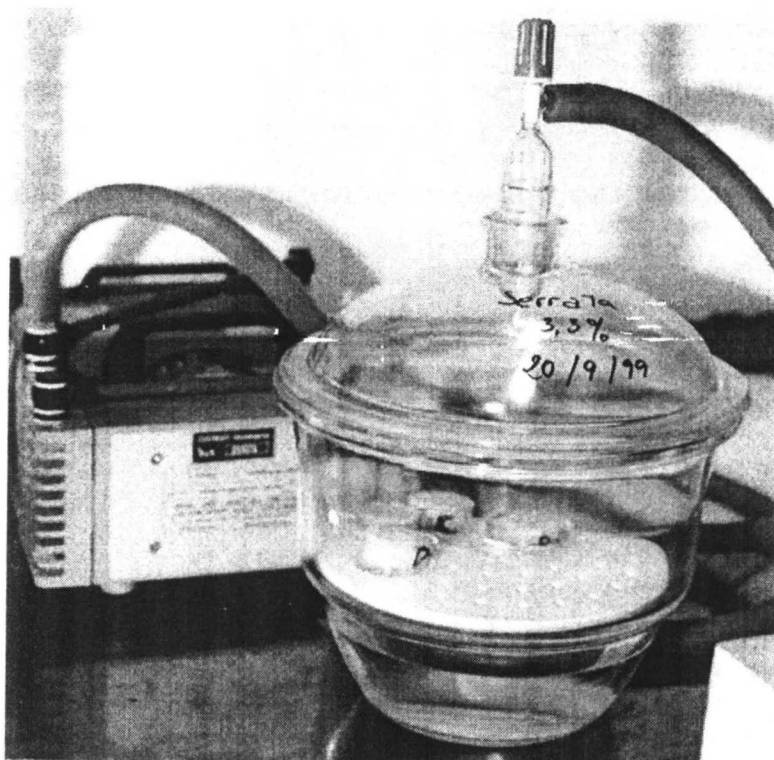


Figura 40: Desecador con disolución de ácido sulfúrico y pastillas de bentonita en el momento de hacer el vacío

Si se está determinando una curva de retención, la muestra pasará a otro escalón de succión tras hacer la última pesada y medirla para determinar su densidad seca. Si por el contrario, se está determinando un punto singular de la relación succión/humedad o bien es el final del ensayo de determinación de la curva de retención, la muestra se mide y se seca en estufa a 110 °C durante 24 horas, para comprobación de densidad y humedad finales.

Así mismo se comprueba con el picnómetro la densidad final de la disolución de ácido sulfúrico del desecador, que nos dará el valor exacto de la succión a que han estado sometidas las muestras.

Curva de retención a volumen constante

Las curvas determinadas a volumen libre, es decir, según se ha descrito en la sección anterior, reflejan la relación entre succión y grado de saturación de un material cuya porosidad varía constantemente durante el ensayo. Estas variaciones de densidad no se producirán en el caso de la bentonita en la barrera del almacenamiento, ya que, al estar

confinada, las variaciones de volumen serán pequeñas. Surgió por tanto la necesidad de controlar el volumen de la muestra a la vez que se aplicaba la succión. Para conseguir, por una parte reproducir con mayor fidelidad la situación de la arcilla en el almacenamiento, y por otra, mantener una característica fundamental del material, como es su porosidad, constante durante toda la determinación, se han puesto a punto dos métodos experimentales que permiten, además de controlar la succión aplicada, impedir la variación del volumen de la muestra durante el ensayo.

Estos métodos son: la determinación de la curva de retención en edómetro con succión controlada y la utilización de celdas perforadas indeformables en atmósfera de humedad relativa controlada. El primero de ellos se ha empleado para la determinación de las curvas a 20 °C, y el segundo, desarrollado posteriormente, para la determinación de la curva a 40 °C. El control dimensional de la muestra, que sólo se consigue en las trayectorias de humectación, es mucho mejor cuando se utilizan las celdas indeformables, que fueron diseñadas específicamente para este tipo de ensayo.

Curva de retención en edómetro con succión controlada

Para conseguir mantener la densidad constante durante toda la determinación, se ha realizado ésta en los edómetros con succión controlada, en los que es posible, además de aplicar una succión determinada, mantener el volumen de la muestra constante por medio de la adición de cargas. Este método sólo permite mantener el volumen constante durante las trayectorias de humectación, ya que el hinchamiento se puede evitar cargando la muestra, pero no la retracción que se produce al desecar. Por otra parte, es difícil conseguir el control perfecto del volumen de la muestra, y durante el ensayo se producen pequeñas variaciones en la densidad seca, especialmente en los casos de densidades secas elevadas cuyo hinchamiento no se puede contrarrestar completamente con la capacidad de los equipos utilizados. Además, la aplicación de las cargas produce una deformación en el sistema que, a pesar del tarado previo, en ocasiones es difícil distinguir de la deformación de la muestra, especialmente cuando se utiliza membrana.

Los equipos edométricos utilizados disponen de celdas edométricas modificadas en las que es posible aplicar succión. Estos equipos y su utilización se describen en la sección siguiente “Ensayos edométricos con succión controlada” y con más detalle en el Anexo V.

La arcilla, con su humedad de equilibrio en las condiciones del laboratorio, se ha compactado uniaxialmente en el interior de los anillos portamuestra de la celda para obtener pastillas cilíndricas de altura 1,20 cm y sección de 11,40 ó 19,24 cm².

Una vez colocados el anillo portamuestra y la muestra en el edómetro, según se describe en la sección “Ensayos edométricos con succión controlada”, se impone la succión deseada y se observa la deformación reflejada por el comparador. Cuando la arcilla empieza a hinchar se aplican cargas que contrarresten la deformación, procurando que ésta se mantenga inferior a 0,005 cm. Una vez alcanzado el equilibrio para una succión dada, es decir, cuando no hay modificación de la deformación para una tensión vertical constante, se libera la celda, se pesa el anillo y la muestra (ya que la muestra no se puede extraer del anillo sin alterarla) y se mide la pastilla. La altura de la muestra (h_m) se determina de forma indirecta, por diferencia entre la altura del anillo (h_a) y la medida desde la superficie de la muestra hasta el borde superior del anillo (h_d), según se muestra en la Figura 41. En ocasiones, cuando las cargas aplicadas son muy elevadas, no es posible despegar el pistón de carga de la muestra; en ese caso la medida indirecta de la pastilla se realiza según se esquematiza en la Figura 42 (cf. Anexo V). Inmediatamente el anillo portamuestra se vuelve a montar en la celda y se aplica la tensión vertical y la succión de antes de desmontar, esperando 24 horas a que se vuelva a alcanzar el equilibrio antes de pasar al siguiente escalón de succión. La duración de cada escalón se ha fijado en un tiempo mínimo de 20 días, incluso aunque la deformación para una misma carga se estabilice antes.

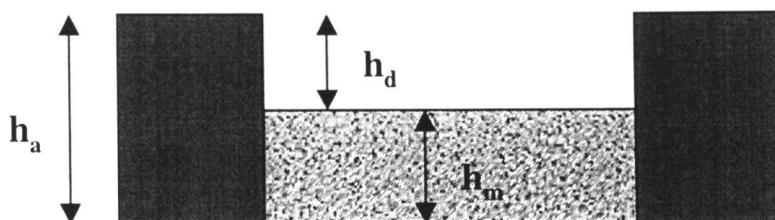


Figura 41: Medida indirecta de la muestra en los escalones intermedios de determinación de la curva de retención a volumen constante

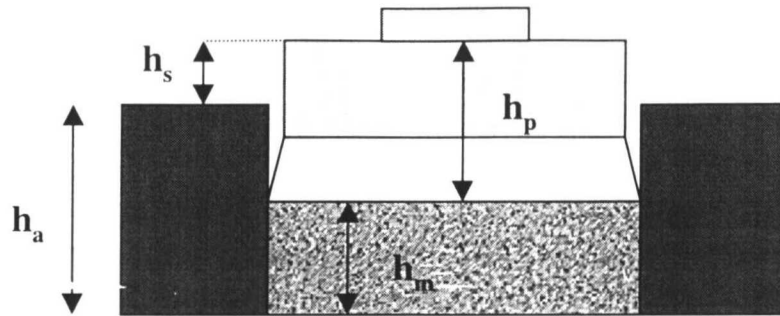


Figura 42: Medida indirecta de la muestra en los escalones intermedios de determinación de la curva de retención a volumen constante, cuando no es posible despegar el pistón

En los edómetros con control de succión mediante disoluciones, los ensayos han comenzado por una succión similar a la de las condiciones del laboratorio (H.R. 50 %, succión 130 MPa), para ir a continuación disminuyéndola de forma escalonada. En los ensayos realizados en edómetros con control de humedad mediante presión de nitrógeno, la máxima succión aplicable, 14 MPa, está muy lejos de la inicial de equilibrio con el ambiente del laboratorio, por lo que se produce en todos los casos una humectación brusca de la muestra al colocarla en el edómetro. Posteriormente se han seguido trayectorias de humectación (disminución de la succión), o secado (aumento de la succión). Todos los ensayos se han realizado a 20 °C.

Esta técnica está sujeta a averías que pueden llegar a invalidar el ensayo, especialmente en el caso de los edómetros con succión controlada mediante presión de nitrógeno. Presenta también imprecisiones a la hora de conocer la altura exacta de la pastilla, y por tanto su densidad, debido al desmontaje que se realiza para cada cambio de succión, durante el que se puede producir cierta relajación incontrolada de la muestra. Por otra parte, con esta técnica, a la vez que se determina la relación succión/humedad, se conoce la presión de hinchamiento para diferentes succiones, que corresponde a la carga que es necesario aplicar en cada escalón para estabilizar la deformación.

Curva de retención en celdas indeformables

Como se ha señalado, la determinación de la curva de retención en edómetros con control de la succión no permite el control dimensional perfecto de la muestra durante toda la

determinación, especialmente para las densidades altas. Además, la técnica es dificultosa y está sujeta a averías e imprecisiones. Por estos motivos, en la etapa final de esta investigación, se diseñaron unas celdas cilíndricas indeformables que impiden la variación del volumen de la muestra. Estas celdas constan de un cuerpo cilíndrico de 0,5 cm de espesor y de dos tapas perforadas unidas por tornillos; todos los elementos fabricados en acero inoxidable de alta resistencia a la corrosión por la casa Mecánica Científica (Getafe) (Figura 43).

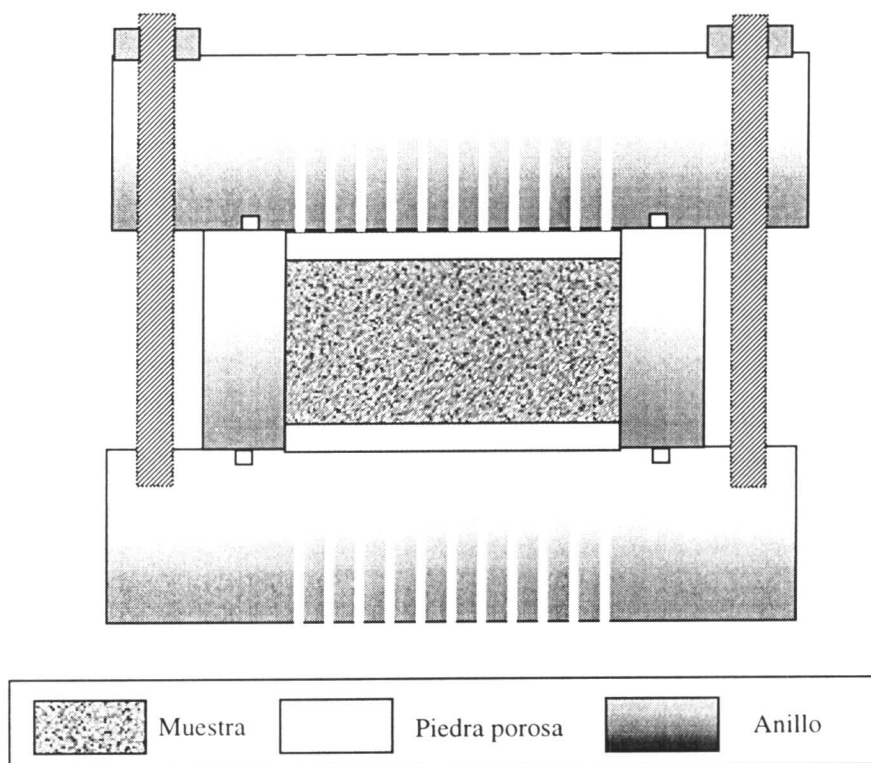


Figura 43: Celda indeformable para determinación de la curva de retención

La muestra se compacta directamente en el interior de la celda, a partir del granulado de arcilla con su humedad higroscópica. La altura de las pastillas es de 1,20 cm, y su sección de 3,80 cm². Entre las tapas de la celda y la muestra se coloca un papel de filtro Whatmann 54 y una piedra porosa. Todas las piezas se taran al inicio del ensayo. Una vez ajustadas las tapas, se introduce la celda en un desecador con disolución de sulfúrico y se hace el vacío. Sobre la placa porosa del desecador se pueden colocar tres celdas. El método de control de succión es, por tanto, el de control de la humedad relativa que se explica más arriba, por lo que la metodología del ensayo es similar a la de determinación de la curva de retención a volumen libre en desecadores (*cf.* sección “Ensayo en desecadores”).

La piedra porosa y las tapas perforadas permiten el intercambio de humedad en fase vapor entre la arcilla y la atmósfera del desecador. Este proceso es muy lento –más que el de determinación de la curva de retención a volumen libre en desecadores–, no sólo porque no toda la superficie de la muestra actúa como superficie de intercambio (sólo la parte superior e inferior), sino porque éste se realiza a volumen constante. Periódicamente (cada 3 ó 4 semanas, dada la lentitud del proceso) se comprueba la variación de peso de la muestra, para lo que se abre el desecador, se desatornillan las tapas de las celdas y se quitan las piedras porosas. De esta manera se pesa el cuerpo cilíndrico de la celda con la muestra y los papeles de filtro superior e inferior, ya que éstos últimos no se pueden despegar. Por ello, en el mismo desecador deben introducirse varios papeles de filtro del mismo tipo y tamaño, que han de pesarse a la vez que las celdas, para conocer sus cambios de humedad y restarlos de los de la muestra. Una vez realizada la pesada, se colocan las piedras porosas, se vuelven a apretar las tapas, se introducen las celdas en el desecador y se hace el vacío. Se mantiene la misma disolución de ácido sulfúrico hasta que el peso de las muestras se estabiliza –lo que indica que se ha completado la transferencia de agua–, para lo que se requiere un tiempo comprendido entre dos y tres meses. Una vez alcanzado el equilibrio, se cambia la disolución del desecador y se comprueba su densidad, para calcular la succión aplicada en cada escalón.

En esta investigación se ha aplicado este método sólo a la determinación de las curvas de retención a 40 °C. Para ello, el desecador se introduce a su vez en una estufa con temperatura regulada y permanece en ella hasta el momento de realización de las pesadas y cambio de la disolución (Figura 44). La medida de la densidad de la disolución que se retira del desecador se realiza a 20 °C, es decir, una vez enfriada, por lo que el cálculo de la correspondencia entre la densidad de la disolución (d , g/cm³) y el porcentaje en peso de sulfúrico (p) se hace según el ajuste para 20 °C que se mostró en la sección “ENSAYOS CON SUCCIÓN”. Sin embargo, la relación entre el porcentaje en peso de la disolución y su actividad (a_w), se establece teniendo en cuenta la temperatura a la que se realizó la determinación. Para 40 °C esta relación es (Gmitro & Vermeulen 1964):

$$a_w = 7 \cdot 10^{-8} \times p^4 - 7 \cdot 10^{-6} \times p^3 - 0,00001 \times p^2 - 0,0034 \times p + 0,9972$$

Así mismo, el cálculo de succión a partir de la humedad relativa ($HR = a_w/100$) se hace introduciendo la temperatura adecuada en la ecuación de Kelvin.



Figura 44: Desecador con celdas indeformables en el interior de la estufa en el momento de hacer el vacío

Como sucede en el caso de los edómetros con succión controlada, las celdas sólo impiden la variación de volumen de la muestra cuando se produce hinchamiento, es decir, en las trayectorias de humectación, pero no cuando hay retracción. Además, estas celdas no permiten la medida de la presión de hinchamiento, lo que sí se puede realizar en los edómetros. Sin embargo, la determinación de la curva de retención, aunque lenta, es mucho más sencilla y libre de errores que en el edómetro.

Ensayos edométricos con succión controlada

El ensayo edométrico permite estudiar la compresibilidad unidimensional de los suelos. Gracias a él se pueden determinar la velocidad y magnitud de la consolidación de un suelo confinado lateralmente cuando se le carga y drena axialmente.

Un ensayo edométrico convencional consiste en constreñir lateralmente una muestra de suelo y cargarlo axialmente en incrementos, aplicando un esfuerzo constante hasta que los excesos de presión del agua de los poros se disipan para cada incremento. Durante el proceso de compresión se mide la variación de la altura de la muestra, lo que permite establecer relaciones entre el esfuerzo efectivo y el índice de poros o la deformación (ASTM D 2435-80). Los mismos equipos con metodologías similares permiten la realización de ensayos en los que se determina la magnitud del hinchamiento bajo una presión vertical dada, y la presión necesaria para mantener constante el volumen de muestras confinadas lateralmente y cargadas axialmente (ASTM D 4546-85).

La celda edométrica consiste básicamente en un anillo rígido en el que se comprime el suelo entre dos placas porosas, cuyo desplazamiento relativo puede medirse con exactitud. La carga se aplica axialmente sobre la muestra a través de un yugo y por medio de un sistema de palancas.

Cuando se realizan ensayos edométricos con succión controlada se introduce una variable de estado más en el sistema de esfuerzos, la succión. Esto supone que la muestra, además de sufrir modificaciones en la tensión vertical, se somete a succiones diferentes durante el ensayo. Así, la succión se puede mantener constante mientras dura el proceso de carga de la muestra; o bien, ésta puede experimentar trayectorias de secado o humectación, por aumento o reducción de la succión, mientras la tensión vertical permanece constante.

Para controlar la succión se han utilizado las dos técnicas descritas al principio de este capítulo, la traslación de ejes y la imposición de una humedad relativa. En ambos casos, la succión se impone, pero no se mide, puesto que no existen técnicas convencionales para medir succiones elevadas en materiales muy expansivos. El control de la succión (s) se realiza cambiando los valores de la presión de aire (u_a) o de la presión de agua (u_w) en los poros de la muestra, puesto que los cambios de succión vienen dados por la diferencia entre ambas ($s=u_a-u_w$). En concreto, la succión se ha aplicado mediante presión de nitrógeno para valores entre 0,1 y 14 MPa, y mediante disoluciones de ácido sulfúrico para valores entre 3 y 500 MPa.

Para poder aplicar la succión mientras se realiza el ensayo edométrico es necesario utilizar celdas edométricas modificadas. Se han utilizado celdas similares a las desarrolladas en el

CEDEX y descritas por Esteban (1990) –la celda de membrana– y por Esteban & Sáez (1988) y Esteban (1990) –la celda con depósito para disolución–, ambas fabricadas por la casa Mecánica Científica (Getafe).

En concreto se ha dispuesto de cinco celdas para control de la succión por presión de nitrógeno (Figura 45) y de otras cinco para control de succión mediante disoluciones de ácido sulfúrico (Figura 46).

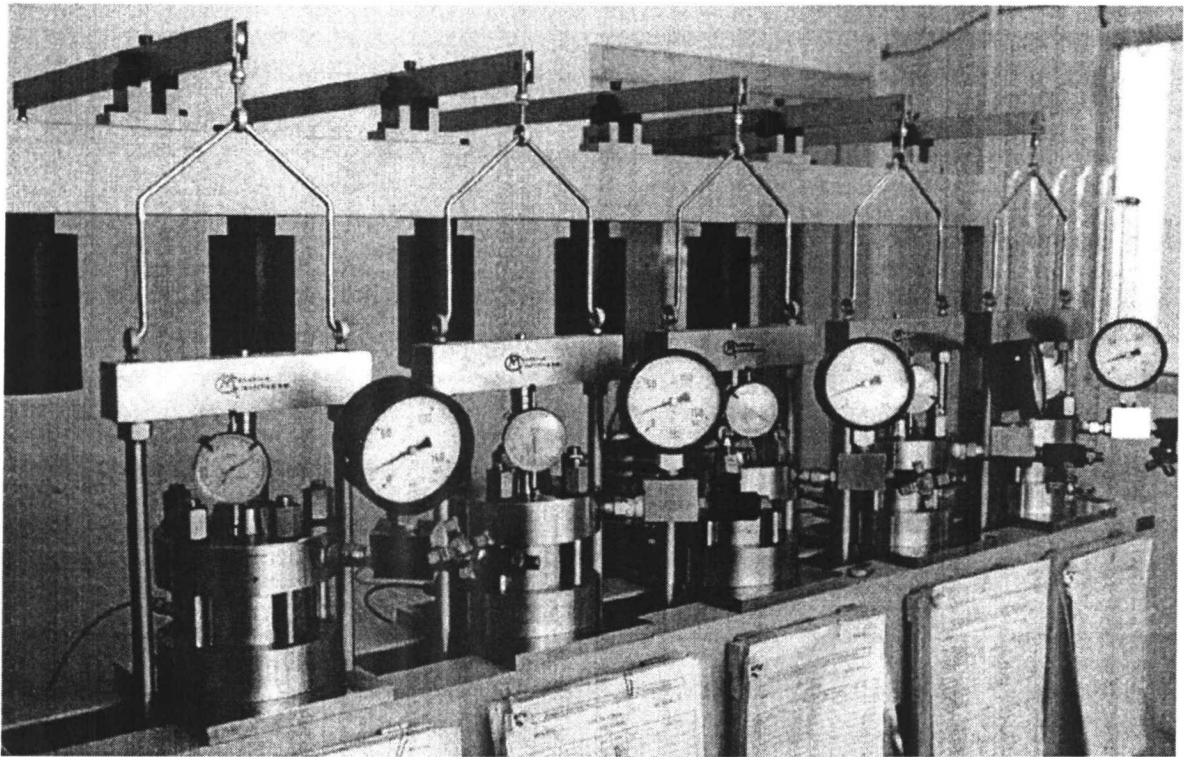


Figura 45: Bancada edométrica con cinco puestos para celdas de membrana

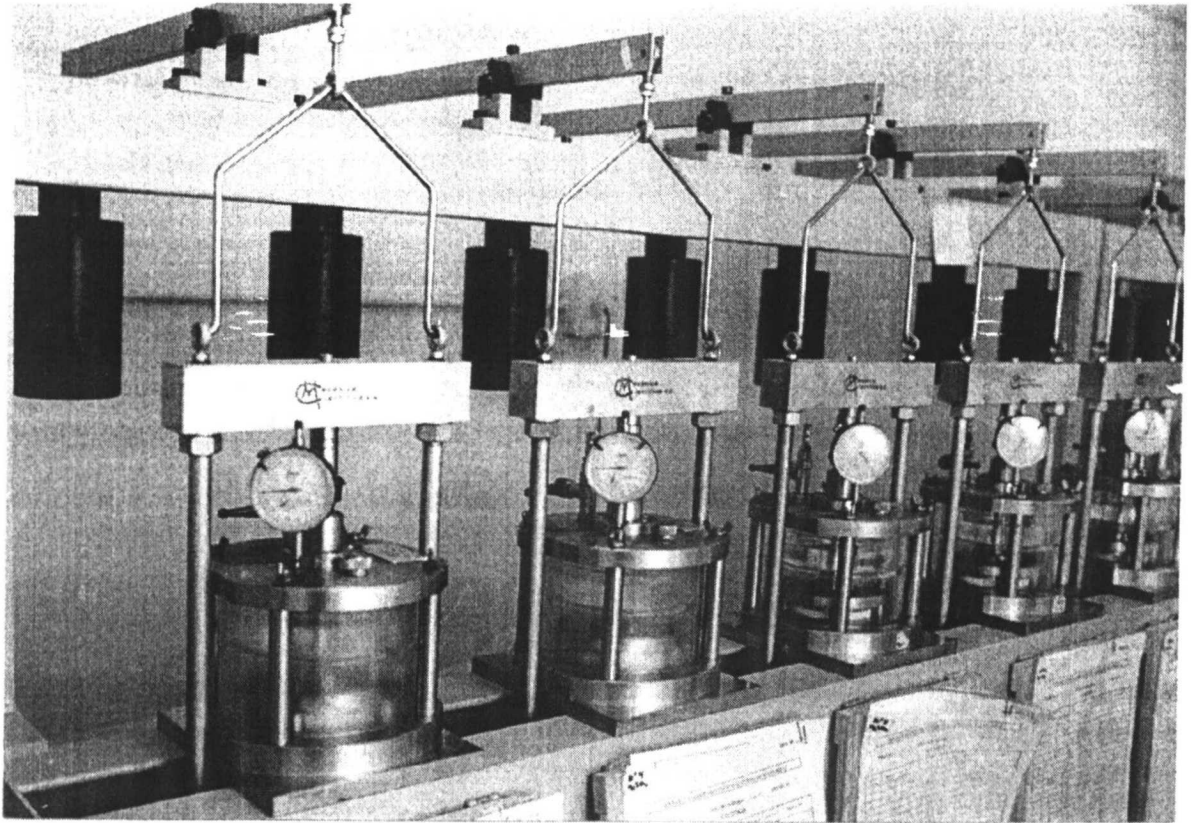


Figura 46: Bancada edométrica con cinco puestos para celdas con depósito para disoluciones

La celda de membrana está fabricada en acero inoxidable y consta de base, tapa y cuerpo central (Figura 47). En el cuerpo de la celda se aloja el anillo portamuestra. La parte superior de la celda tiene un orificio central que permite el paso del vástago de carga. Éste apoya sobre el pistón de reparto de carga, que lleva pegada una piedra porosa en la parte inferior, que permanece directamente en contacto con la muestra. La tapa de la celda lleva también la entrada de gas con un manómetro acoplado para presiones de hasta 16 MPa. Exteriormente, un comparador de deformación que aprecia milésima de milímetro, unido al vástago de carga, apoya sobre la tapa de la celda. La parte inferior lleva encastrada una piedra porosa por debajo de la cual hay dos orificios de entrada y salida, conectados a una bureta con agua a presión atmosférica. Sobre esta piedra porosa se coloca la membrana de celulosa regenerada semipermeable, y sobre ella apoya directamente la muestra. Esta membrana permite el paso de agua e iones a través de ella, pero no de gas. Una bomba peristáltica, instalada entre la bureta y las tomas de la celda, facilita la evacuación del gas que pueda difundir a través de la membrana. Se ha utilizado como gas nitrógeno industrial.

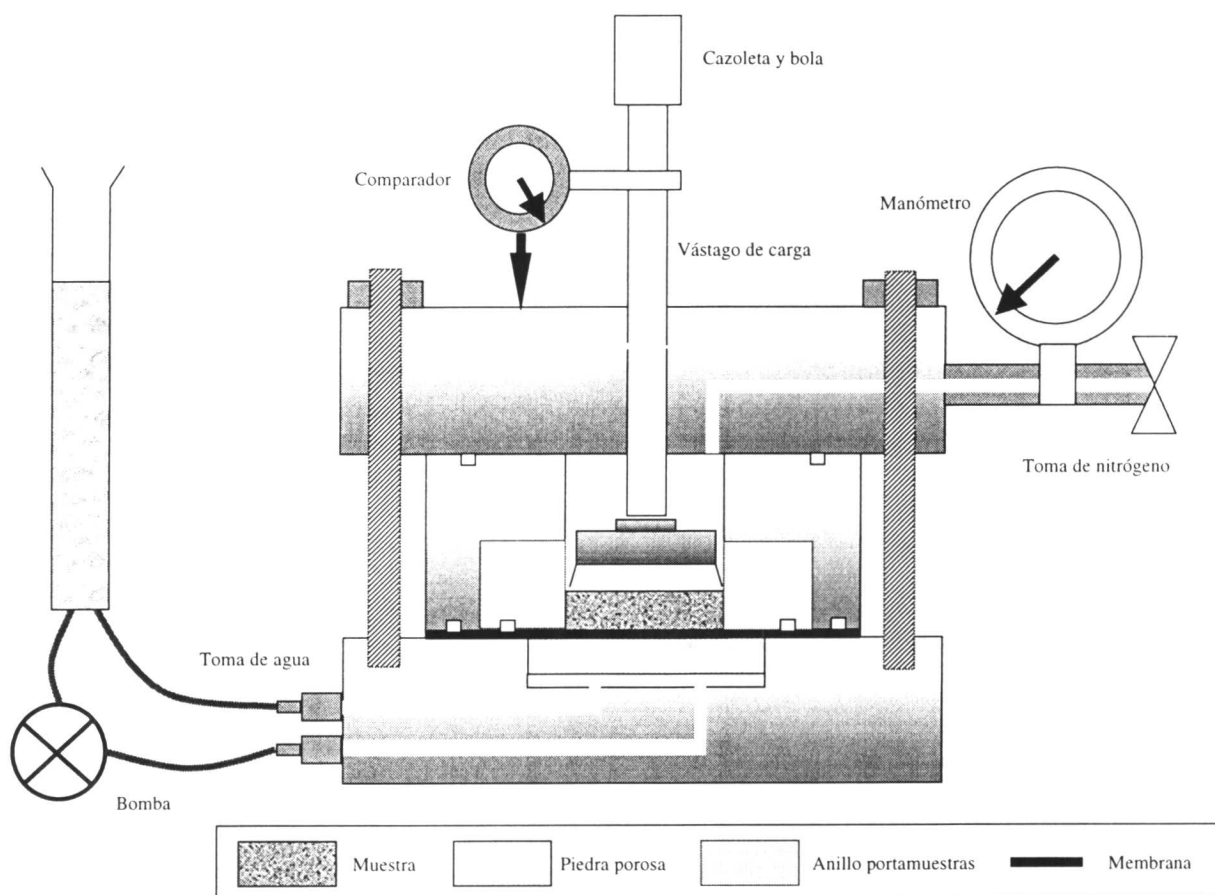


Figura 47: Sección esquemática de una celda de membrana para ensayo edométrico

La celda con depósito para disoluciones consta de base y tapa fabricadas en acero inoxidable de alta resistencia a la corrosión (AISI 316L), y de un cuerpo cilíndrico fabricado en material transparente (metacrilato) que posee un resalte interno sobre el que apoya un depósito de cristal en forma de anillo (Figura 48). Sobre la base de la celda apoya una piedra porosa, sobre ella el anillo portamuestras y finalmente el pistón solidario con la piedra porosa superior. Este conjunto se sujeta a la base de la celda mediante una brida de acero. La tapa superior presenta un orificio que permite el paso del vástago de carga, una perforación con tapón para la introducción del ácido sulfúrico y una entrada cerrada mediante llave para hacer el vacío. Exteriormente, un comparador de deformación que aprecia milésima de milímetro, unido al vástago de carga, apoya sobre la tapa de la celda.

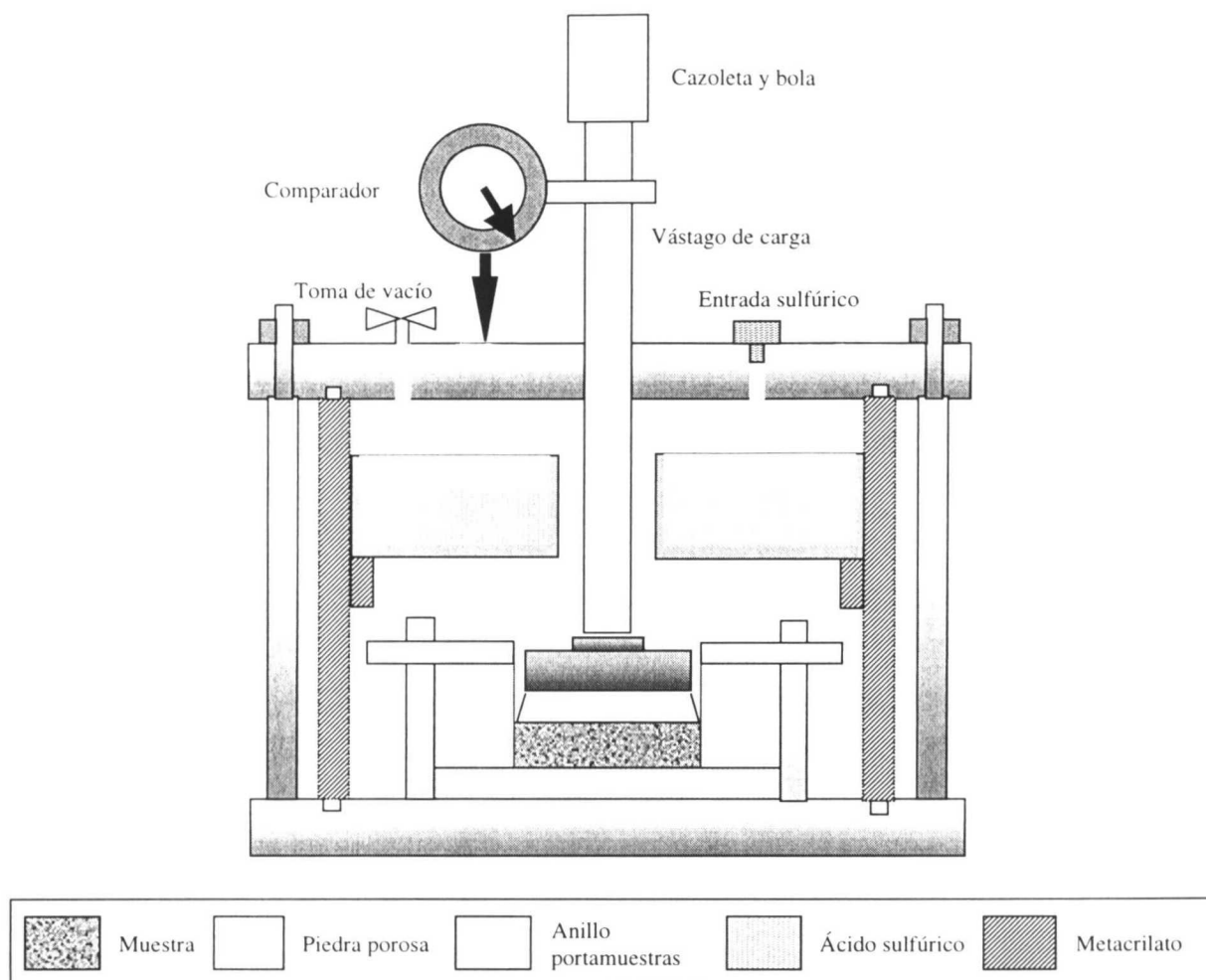


Figura 48: Sección esquemática de una celda edométrica con depósito para disolución

Los pasos detallados para el montaje y desarrollo del ensayo se describen en el Anexo V. Se comienza por la fabricación de la pastilla por compactación uniaxial de la arcilla directamente en el anillo del edómetro. Todos los ensayos se han realizado en pastillas compactadas a densidad seca nominal de $1,70 \text{ g/cm}^3$, utilizando la arcilla con su humedad higroscópica. La presión necesaria para alcanzar esta densidad es de 20 MPa. La altura inicial de la pastilla es de 1,20 cm, y la sección de 11,40 ó 19,24 cm^2 .

Se determinan con antelación los valores de succión y carga que se van a aplicar (escalones), cuyo número dependerá del detalle con que se requiera definir la curva y de las características de la muestra. Se definen los valores iniciales de presión vertical y succión, calculando las cargas a aplicar. La tensión vertical se obtiene mediante la aplicación de pesas de plomo en el colgadero. La relación entre pesas y presión es función del brazo de palanca del edómetro, que en los edómetros utilizados es de 7,695, y de la

sección de la muestra; por lo que la máxima presión vertical aplicable en el edómetro es de 9 MPa para la sección más pequeña y de 5 MPa para la sección mayor.

El anillo portamuestras se monta en la celda, se cierra ésta y se coloca en su alojamiento. En el caso de las celdas de membrana se comienza por aumentar la presión en la celda, inyectando gas nitrógeno hasta el valor de succión deseado. Este incremento de presión se hace lentamente y siempre precedido por la colocación de la carga de compensación correspondiente. La carga de compensación es necesaria para evitar el desplazamiento del vástago de carga ocasionado por la presión de nitrógeno en el interior de la celda. Su valor es función de la sección del vástago de carga. Una vez alcanzado el valor de succión, se procede a aplicar la carga vertical deseada, mediante la colocación de pesas en el colgadero.

En el caso de las celdas con depósito, una vez montadas con el anillo portamuestra y colocadas en el alojamiento del edómetro, se vierten en el depósito 150 cm³ de la disolución de ácido sulfúrico de concentración adecuada para generar la succión deseada. A continuación se hace vacío en la celda y se aplica la carga vertical.

Tras alcanzar los valores de succión y de carga previstos se comienza inmediatamente a registrar la deformación a intervalos de tiempo progresivamente mayores, hasta llegar a las 24 horas.

Una vez estabilizada la deformación para las condiciones de carga y succión correspondientes al escalón inicial, se procede al cambio de escalón. En materiales muy expansivos el tiempo requerido para estabilización puede ser muy largo, por lo que una vez definido el tiempo necesario para que se produzca la mayor parte de la deformación, se puede fijar la duración de cada escalón. En este trabajo se ha fijado un valor mínimo de 20 días.

El efecto de la succión sobre la muestra, a diferencia del de la carga vertical, no es inmediato, porque los procesos implicados son lentos, especialmente en materiales arcillosos. Por ello, cuando el cambio de escalón supone modificación de succión y de carga, la secuencia a seguir es realizar primero el cambio de succión y después el de carga.

En las celdas con presión de nitrógeno, el cambio de presión ha de realizarse lentamente y precedido de la modificación correspondiente de carga de compensación. La deformación registrada por el comparador durante la operación de cambio de presión de nitrógeno se considera propia del aparato, y no atribuible a la muestra, ya que, como se ha dicho, los efectos de la modificación de succión no se manifiestan sobre la muestra de forma inmediata. Tras realizar el cambio de presión se realiza la modificación de carga vertical, e inmediatamente se comienza la secuencia de lecturas.

Para realizar el cambio de escalón en las celdas con depósito, se extrae la disolución mediante una jeringuilla a través del orificio en la tapa de la celda, y se introduce la nueva disolución mediante un embudo de cristal. Una vez cerrada la celda se vuelve a hacer el vacío, se aprietan los cierres de la tapa y se ajusta la lectura del comparador a la última lectura del escalón anterior. Si se precisa hacer también un cambio de carga vertical, se realizará la modificación de la carga en este momento. Inmediatamente se inicia la secuencia de lecturas. Para conocer el valor exacto de succión a que ha estado sometida la muestra se comprueba con picnómetros la densidad de las disoluciones extraída e introducida.

El equipo edométrico puede sufrir cierta deformación instantánea al aplicarse la carga y al descargar. Esta deformación debe medirse cuidadosamente para poder discernir en cada momento qué parte de la deformación medida corresponde efectivamente a la muestra y cuál ha de sustraerse por corresponder al aparato. La forma de hacerlo es calibrar el equipo utilizando una pastilla, de la misma altura que la muestra con que se trabaja habitualmente y de diámetro 1 mm menor, no deformable bajo las cargas aplicadas, de acero, que se coloca en el lugar de la muestra. El tarado ha de hacerse también incluyendo el papel de filtro o la membrana y saturándolos con agua destilada, tal y como se hace en el ensayo con muestra (ASTM D2435). A continuación se procede a la carga escalonada del equipo y posteriormente a su descarga. Se registra la deformación en cada escalón de carga, con el fin de obtener una curva que relacione carga con deformación en todo el intervalo de cargas aplicables. Se ha de obtener una curva para la rama de carga y otra para la rama de descarga, ya que suelen presentar histéresis, especialmente si se utiliza papel de filtro o membrana. La deformación del equipo ha de irse corrigiendo de la lectura registrada a

medida que se aplican las cargas. La Figura 49 muestra las curvas de tarado obtenidos en uno de los edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno.

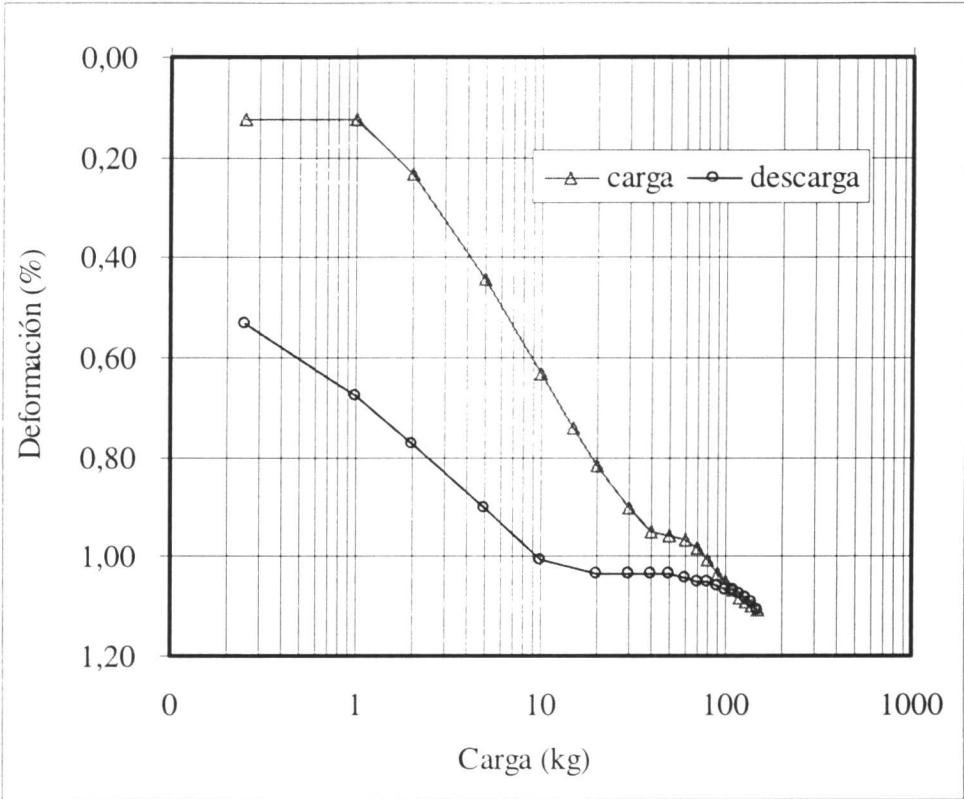


Figura 49: Curvas de tarado en un edómetro con control de succión mediante presión de nitrógeno, realizadas con la membrana saturada con agua destilada

Una vez alcanzado el equilibrio del último escalón del ensayo, se procede a su desmontaje. Se pesa y mide la muestra y se determina su humedad final por secado en estufa a 110 °C durante 24 horas. Con estos datos pueden calcularse y comprobarse el peso seco, la densidad y humedad iniciales y la densidad seca final.

Para cada lectura tomada a diferentes tiempos se realizan los siguiente cálculos:

1. La equivalencia entre lectura del comparador y altura de la muestra, teniendo en cuenta la lectura inicial del comparador, su apreciación y la altura inicial de la pastilla. Una vez conocida la altura de la muestra en cada momento se puede calcular su densidad seca, y a partir de ésta y del peso específico del material se calcula su índice de poros. La lectura inicial de cada escalón se corrige de acuerdo a los datos de tarado del equipo.

2. La deformación en cada momento (ϵ_t) se calcula como la relación entre la variación de altura experimentada por la muestra (diferencia entre altura inicial y altura en cada momento, Δh) y la altura inicial (h_i), expresada en tanto por ciento, considerándose de signo negativo los aumentos de altura.

$$\epsilon_t = \frac{\Delta h}{h_i} = \frac{h_i - h_t}{h_i}$$

Los resultados de cada escalón pueden presentarse como una gráfica semilogarítmica de la evolución del porcentaje de deformación o del índice de poros en función del tiempo (curvas de consolidación o hinchamiento).

Los resultados del conjunto del ensayo pueden presentarse en una gráfica semilogarítmica que relacione el índice de poros final de cada escalón con la carga vertical o succión correspondientes (curva edométrica).

La mayoría de los ensayos se ha realizado a temperatura constante de 20 °C. Algunos ensayos se han realizado en las celdas de membrana introducidas en un baño termostático con silicona fluida (Figura 50). La temperatura de este baño se puede regular, lo que ha permitido realizar ensayos a 40, 60 y 80 °C. La celda que se introduce en el baño tiene un diseño similar a las que se han descrito más arriba, con la particularidad de que el manómetro para control de la presión aplicada no forma parte de la celda, sino que está conectado a ella mediante un tubo de acero inoxidable, lo que permite colocarlo alejado del baño termostático.

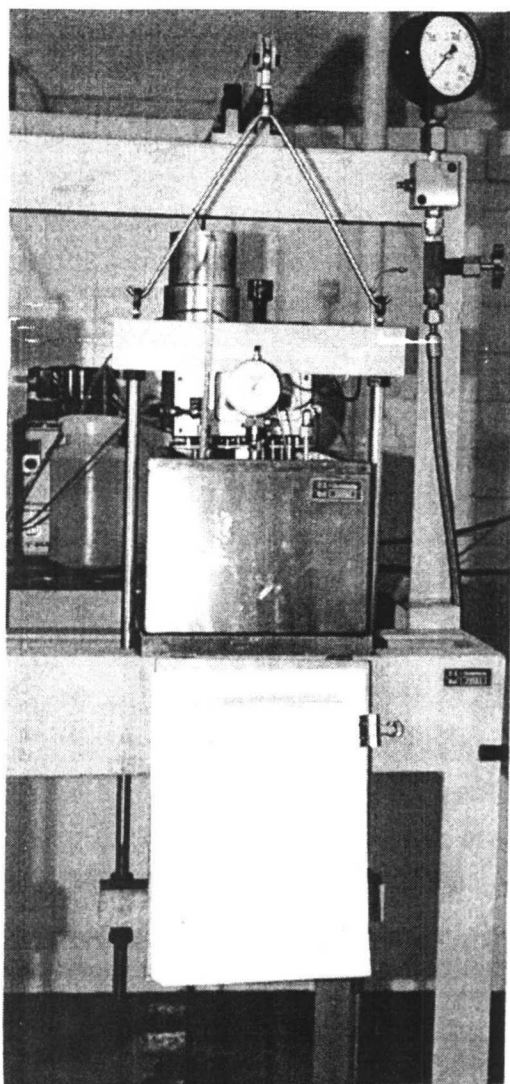


Figura 50: Edómetro con succión controlada mediante presión de nitrógeno instalado en un baño termostático (manómetro a la derecha, bomba peristáltica y depósito de agua a la izquierda)

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica es la capacidad de un suelo para conducir una cantidad de calor en presencia de un gradiente de temperatura. Es una de las propiedades que gobiernan el flujo de calor y que por lo tanto es necesario conocer, por ejemplo, para establecer la distribución de temperaturas en un suelo y la influencia de la temperatura en el movimiento del agua, aspectos ambos claves para la comprensión del comportamiento de la barrera arcillosa en un almacenamiento de residuos radioactivos de alta actividad.

El flujo de calor se produce mediante el concurso de diferentes mecanismos de transporte. A través del material sólido el flujo de calor se realiza por conducción, mientras que, a través de los poros, actúan en paralelo los mecanismos de conducción, convección y radiación. Si además hay agua, el calor latente de vaporización constituye un factor adicional (Jackson & Taylor 1965).

En suelos homogéneos de humedad uniforme se puede suponer que el flujo de calor es conductivo e igual a la conductividad térmica multiplicada por el gradiente térmico (ecuación de Fourier), al asumir implícitamente que la conductividad térmica incluye el flujo térmico de vapor inducido por el gradiente de temperatura (Buchan 1991). La conductividad térmica se define como la cantidad de calor que fluye a través de una unidad de área en la unidad de tiempo bajo un gradiente térmico unitario. Se puede expresar por tanto en $W/m \cdot K$.

Las propiedades térmicas en general y la conductividad térmica en particular, dependen de la composición física del suelo, especialmente de la humedad y, en menor medida, de la densidad, ya que ambas propiedades condicionan la relación cuantitativa entre las distintas fases del suelo (sólido, agua y aire) y cada una de estas fases aporta su contribución a la conductividad térmica macroscópica. Así mismo, existe una cierta dependencia de la temperatura, pero insignificante en el intervalo de temperaturas propio de los suelos. Beziat et al. (1988) encuentran que el aumento de la conductividad térmica de una esmectita cálcica al elevar la temperatura de 50 a 188 °C es de alrededor del 10 %, mucho menor que el observado al variar la humedad o la densidad.

La conductividad térmica superficial se ha medido con un equipo Kemtherm QTM-D3 de la marca Kyoto Electronics, que funciona según el método transitorio del hilo caliente (Figura 51). Los métodos transitorios presentan la ventaja frente a los estacionarios de que el movimiento de agua en respuesta a los gradientes térmicos aplicados para la determinación se ve minimizado, especialmente si éstos son pequeños. Por lo tanto, los métodos transitorios de medida de la conductividad térmica son más recomendables que los estacionarios para suelos que no están secos.

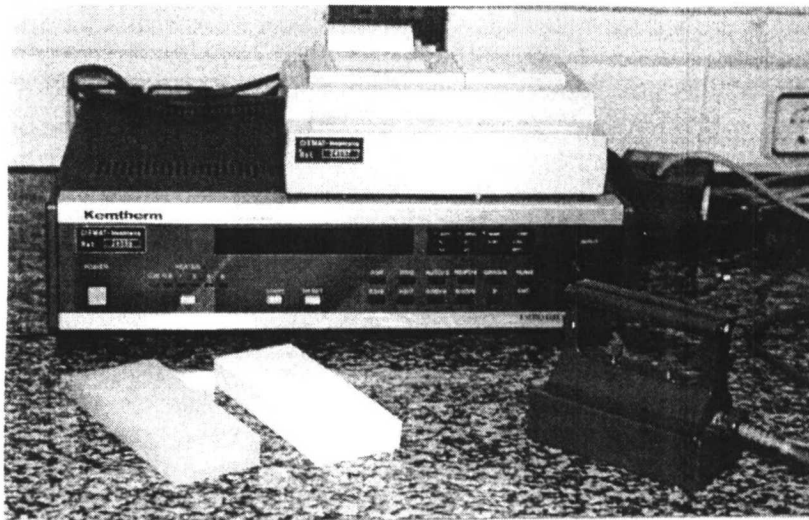


Figura 51: Conductímetro Kemtherm QTM-D3 con la sonda y las placas patrón

El método transitorio del hilo caliente está basado en que la temperatura de un hilo caliente delgado sube exponencialmente cuando se le aplica una potencia constante (flujo de calor) mientras se encuentra estirado en el centro de una muestra cilíndrica o un paralelepípedo rectangular de longitud infinita. Esto permite calcular la conductividad térmica del material en base al flujo de calor (potencia e intensidad), a las características del alambre calentador (longitud, radio y resistencia) y al aumento de temperatura en el alambre en un tiempo determinado.

El equipo de medida empleado está basado en el método de la sonda, una variante del método transitorio del hilo caliente en la que el alambre, en lugar de estar introducido en la muestra, está colocado entre la muestra y un material aislante de conductividad térmica conocida (Kyoto Electronics 1987). Este material aislante y el alambre, junto con un termopar de tipo K para medida de la variación de la temperatura, constituyen la sonda de medida. En el caso de aplicar el método de la sonda, la conductividad térmica (λ , W/m·K) se calcula mediante la ecuación:

$$\lambda = K \frac{I^2 \ln(t_2/t_1)}{V_2 - V_1} - H$$

en la que V_1 y V_2 son el voltaje inicial y final de salida del equipo de medida (V); I es la intensidad de la corriente (A); t_2 y t_1 son el final y el inicio del tiempo de medida (s); y K y

H son las constantes de la sonda, que se calculan a partir de la resistencia del alambre, la potencia termoeléctrica del termopar y la conductividad térmica del material aislante. Estas constantes deben verificarse y ajustarse mediante confrontación de la medida obtenida sobre tres muestras patrón de conductividad térmica conocida.

El valor de conductividad térmica obtenido con este método o con el método del hilo caliente convencional coinciden, puesto que la relación entre la variación de temperatura y el tiempo es prácticamente la misma en los dos casos (Kyoto Electronics 1987). Esto se comprobó en medidas realizadas con las dos técnicas sobre otra bentonita procedente del yacimiento Cortijo de Archidona (Luis y Luis 1990, Rivas et al. 1991).

La medida se realiza a temperatura ambiente, aplicando sobre la muestra a ensayar la sonda, que suministra mediante el alambre una potencia conocida durante 60 s, lo que produce un incremento de temperatura de unos 20 °C. Al ser un periodo de tiempo corto, la muestra sólo se calienta en la proximidad del alambre calentador, lo que implica que el valor de la medida corresponde a la conductividad térmica de la superficie de la muestra sobre la que se aplicó la sonda. Para valores de conductividad térmica de entre 0,02 y 10 W/m·K, usuales en materiales geológicos, el flujo generado por el alambre calentador es de entre 3 y 30 kcal/m·h.

Para que el cálculo de la conductividad térmica sea correcto, la muestra ha de tener unas dimensiones mínimas que eviten que el calor generado salga de la muestra hacia la sustancia que la rodea (aire, por ejemplo), lo que modificaría la medida. Estas dimensiones dependen de la conductividad térmica de la muestra. Por este motivo, y siguiendo las indicaciones del fabricante, se ha determinado la conductividad térmica de la arcilla FEBEX compactada en forma de probetas paralelepédicas de 10 cm de longitud, 4 cm de altura y 3 cm de anchura, para lo que se ha diseñado un molde de compactación específico (Figura 52).

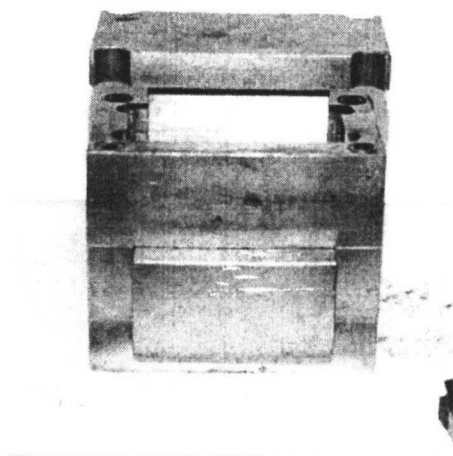


Figura 52: Molde para la compactación de probetas paralelepípedicas para medida de la conductividad térmica

Tras cepillar la superficie de la probeta para eliminar restos de material suelto, se coloca sobre ella la sonda, se deja que la temperatura de ambas se equilibre y se aplica el flujo de calor durante 60 s. Se ha de comprobar que el incremento de temperatura provocado está en un intervalo de entre 10 y 30 °C. Si no es así, la medida no es válida, por lo que se modifica la intensidad de corriente en el calentador y se repite el ensayo. Sobre cada muestra se realizan tres medidas válidas, separadas por un intervalo de tiempo que garantiza el enfriamiento de la muestra y sonda hasta la temperatura ambiente (15 minutos). La precisión de medida del equipo es del 3 %. Los resultados quedan registrados por una impresora conectada al equipo.

Se han realizado medidas sobre muestras compactadas uniaxialmente a diferente densidad y con diferente humedad, para comprobar la repercusión de ambas propiedades sobre el valor de la conductividad térmica. Tras realizar la medida, se pesa y se mide la muestra y se seca en estufa a 110 °C durante 24 horas (Norma UNE 103-300-93), con lo que se comprueba la humedad y densidad a las que corresponde la medida.

RESULTADOS

RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN BÁSICA

La caracterización básica de un material incluye la determinación de propiedades que, siendo de obtención sencilla, delimitan su clasificación y condicionan su comportamiento. Incluye también la adquisición de parámetros básicos necesarios para el cálculo de otras magnitudes.

Peso específico

El peso específico relativo de las partículas sólidas se ha determinado mediante picnómetros, utilizando agua destilada como medio de suspensión, siguiendo la Norma UNE 103-302, según se describe en la sección “Peso específico”. Se determinó sobre 13 alícuotas de la muestra FEBEX durante la etapa de caracterización básica y, en una investigación posterior, sobre otras 7 alícuotas. El valor medio obtenido es de $2,70 \pm 0,04$.

El peso específico teórico de una montmorillonita, calculado a partir de los pesos atómicos de los elementos de la red cristalina, es de $2,74 \text{ g/cm}^3$ (Jiménez & Justo 1971, Lambe & Whitman 1979). Grim (1968) recoge valores de entre 2,20 y $2,74 \text{ g/cm}^3$, correspondiendo este último al peso específico de una montmorillonita con un contenido en hierro de 3,6 %. La bentonita FEBEX tiene un contenido en hierro de 3,1 %, por lo que el valor de peso específico obtenido parece corresponderse bien con este parámetro. Jiménez & Justo (1971) muestran valores de entre 2,65 y 2,84 para pesos específicos relativos determinados en agua, y Lambe & Whitman (1979) dan valores de entre 2,75 y 2,78. La esmectita cálcica francesa de referencia FoCa, tiene una densidad de grano de $2,67 \text{ g/cm}^3$ (Lajudie 1986).

Límites de Atterberg, superficie específica y granulometría

En este capítulo se recogen los resultados de varios ensayos de caracterización básica que tienen en común que los valores obtenidos dependen, fundamentalmente, del porcentaje de partículas de tamaño arcilla, y de su mineralogía y particularidades texturales.

Se ha determinado el límite líquido y el límite plástico sobre 19 alícuotas diferentes de la arcilla FEBEX, siguiendo las Normas UNE correspondientes, con la particularidad de que el tiempo de macerado de la muestra se ha aumentado a 48 horas, según se explica en la sección “Límites de Atterberg”. Los valores promedio y las desviaciones estándar encontrados son:

Límite líquido: 102 ± 4 %

Límite plástico: 53 ± 3 %

Índice de plasticidad: 49 ± 4

Para la superficie específica externa, determinada según se detalla en la sección “Superficie específica” sobre 20 alícuotas mediante el método BET del punto único, se ha obtenido un valor medio de 32 ± 3 m²/g. Grim (1968) recoge valores de superficie específica externa de diferentes montmorillonitas, determinada con nitrógeno y otros gases, de entre 15 y 82 m²/g, con predominio de los valores de entre 30 y 38 m²/g, dependiendo del estado de deshidratación del mineral. Olphen & Fripiat (1979) hacen un estudio de los valores obtenidos en diferentes laboratorios para una misma montmorillonita, encontrando una variación de entre 21 y 86 m²/g, dependiendo del método empleado y de la forma de preparación de la muestra. Esta variabilidad confirma que el valor de superficie específica no es único, y que depende de factores como las condiciones de desgasificación, la temperatura de la medida y el método empleado para el cálculo (BET del punto único o isoterma completa) (Sing et al. 1985). De hecho, la determinación de la superficie específica de la arcilla FEBEX en otros laboratorios, mediante adsorción de nitrógeno a 77 K y aplicando el método BET según la Norma ASTM D 3663-84, ha dado valores de entre 56 y 59 m²/g (J. Cuevas, com. pers.).

La distribución granulométrica se ha obtenido por combinación de las técnicas de sedimentación y tamizado según el procedimiento descrito en la sección “Granulometría”, cuya particularidad respecto a las Normas UNE es que la suspensión se dispersa de forma más intensa (incluyendo más tiempo de humectación y el uso de ultrasonidos) y que el tamizado se realiza con la muestra dispersada utilizada para la sedimentación. Los resultados de la granulometría, realizada sobre 11 alícuotas diferentes, se muestran en la Tabla IX y se representa gráficamente en la Figura 53.

Tabla IX: Distribución granulométrica media de las 11 muestras analizadas

Tamaño (mm)	Pasante (media, %)	Pasante (desviación estándar, %)
2,000	100	0
1,190	99	0
0,590	98	1
0,297	96	1
0,148	94	1
0,074	93	1
0,057	89	2
0,040	88	2
0,026	87	3
0,015	84	2
0,010	81	2
0,009	80	2
0,005	77	2
0,004	74	2
0,002	67	3

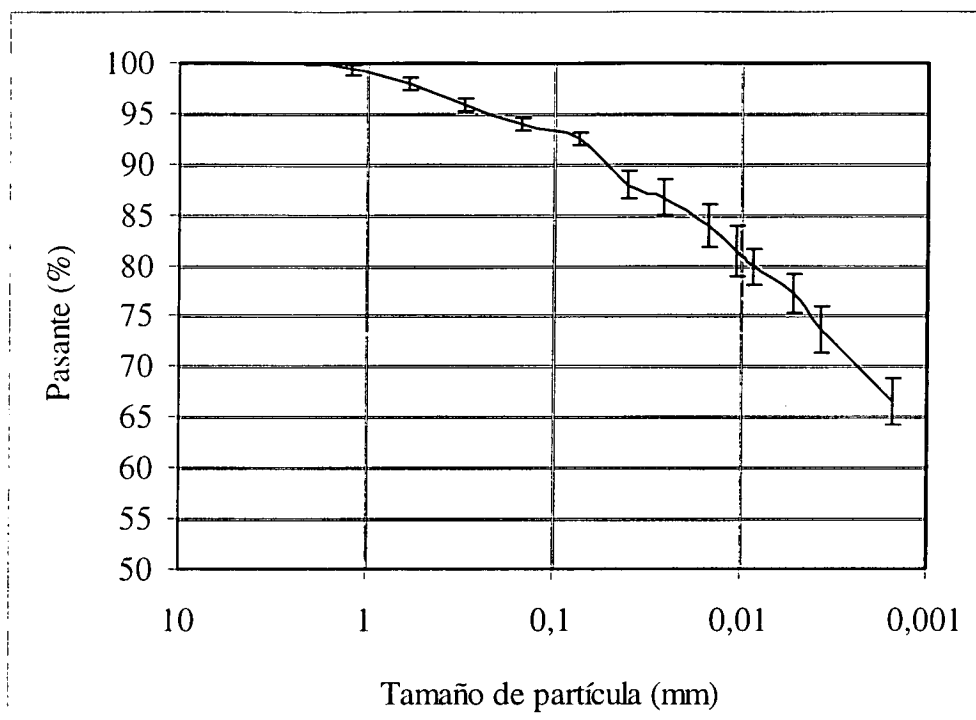


Figura 53: Curva granulométrica media, con indicación de las desviaciones estándar, para las muestras analizadas

Según se comprueba en la Tabla IX, un 67 % del material es de tamaño inferior a 2 μm , es decir, pertenece a la fracción arcilla, y un 22 % pertenece a la fracción limo, puesto que tiene un tamaño comprendido entre 60 y 2 μm . Por lo tanto, el material queda encuadrado dentro de los diagramas texturales del USDA en el grupo de las arcillas. Sin embargo, atendiendo a los límites de Atterberg, el material corresponde, según la clasificación de Casagrande, a un limo inorgánico de plasticidad extremadamente elevada. Por otra parte, el porcentaje de fracción de tamaño arcilla, es decir, menor de 2 μm , es muy bajo para una bentonita de esta pureza mineralógica, constituida por esmectita en más del 90 %. Ello a pesar de que la dispersión de la muestra antes de realizar la granulometría ha sido muy intensa, incluyendo larga humectación, agitación y ultrasonido.

Esta particularidad ya se constató en los primeros estudios de la bentonita de este yacimiento. Pérez del Villar (1989b) atribuye la dificultad de dispersión de la arcilla a la aglutinación de partículas debida a la existencia de sílice coloidal, originada durante la transformación de la roca volcánica en esmectita. White & Dixon (1997), en un estudio realizado con la misma arcilla FEBEX, descubren al microscopio electrónico restos de

cenizas volcánicas de tamaño limo pseudomorfizadas por esmectita. Estos pseudomorfos, de tamaño limo y composición esmectítica, serían relativamente estables y podrían justificar la baja plasticidad de la arcilla, así como el bajo porcentaje de fracción arcilla. La existencia de pseudomorfos no es inusual en las bentonitas, como señalan Ross & Hendricks (1945) al afirmar que éstas pueden retener la estructura de las cenizas volcánicas con gran perfección.

Para confirmar si el bajo porcentaje de partículas menores de 2 μm y el relativamente bajo límite líquido son consecuencia de una especial agregación de las partículas, se ha realizado un tratamiento progresivamente más intenso sobre la arcilla, comprobando la evolución del límite líquido, la distribución granulométrica y la superficie específica. Se ha partido de la muestra molida hasta tamaño inferior a 0,4 mm, que se ha secado durante varios días a 150 °C. Al sacarla de la estufa se toma una parte de la muestra para la realización de la granulometría y otra para determinar la superficie específica, y el resto se amasa con agua destilada y se deja macerar durante 48 horas. Transcurrido este tiempo se determina el límite líquido por el procedimiento habitual. El sobrante de la muestra amasada se vuelve a secar a 150 °C, y al sacarla de la estufa se disgrega con rodillo de madera. Se toman las porciones para la obtención de la distribución granulométrica y la superficie específica, y el resto se vuelve a amasar con agua destilada para la determinación del límite líquido, repitiéndose el tratamiento hasta un total de 9 ciclos de secado/humectación.

La Tabla X recoge los valores de límite líquido (w_L), porcentaje de partículas menores de 1,4 μm (que corresponde al tamaño inferior identificado mediante granulometría por sedimentación, equivalente aproximadamente al porcentaje de partículas tamaño arcilla) y superficie específica externa (a_s) en los sucesivos ciclos.

Tabla X: Evolución de algunos parámetros de la bentonita tras sucesivos ciclos de secado/humectación

Ciclo	w_L (%)	Fracción < 1,4 μm (%)	a_s (m^2/g)
0	102	67	32
1	111		

Ciclo	w _L (%)	Fracción < 1,4 μm (%)	a _s (m ² /g)
2	123		
3	142	82	36
4	147	83	37
5	157	83	40
6	164	86	48
7	172	84	48
8	172	85	57
9	164		

La Figura 54 muestra la evolución del límite líquido, de la superficie específica y del porcentaje de partículas inferiores a 0,0014 mm durante los sucesivos ciclos, considerando para el ciclo 0 los valores de la arcilla sin tratamiento previo.

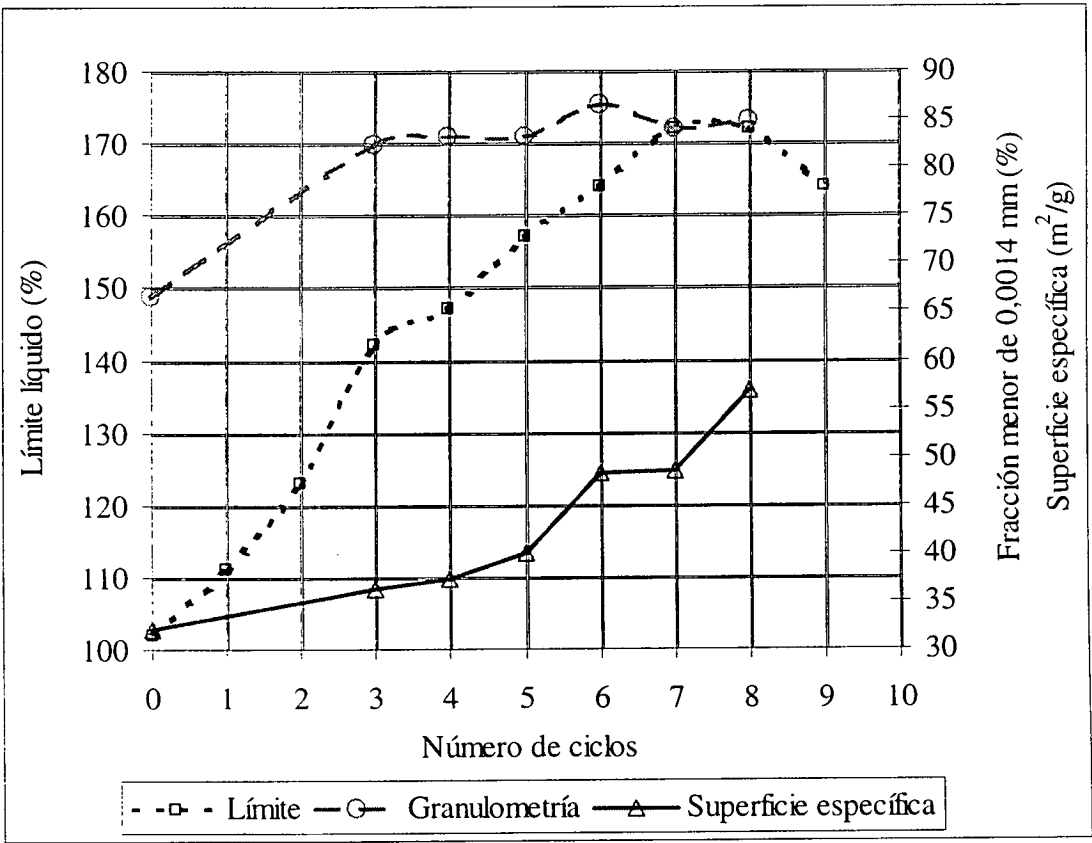


Figura 54: Evolución de los valores del límite líquido, de la superficie específica y del porcentaje de partículas menores de 0,0014 mm tras sucesivos ciclos de secado/humectación de la arcilla

Se observa cómo el límite líquido aumenta desde el primer ciclo de secado/humectación y amasado, llegándose a un valor máximo de aproximadamente 175 % tras el séptimo ciclo, sin que continúe el aumento posteriormente. En cuanto a la granulometría, después del tercer ciclo de secado/humectación, el porcentaje de partículas menores de $1,4\ \mu\text{m}$ ya es superior al 80 %, manteniéndose en valores similares o con tendencia a subir tras los siguientes ciclos. La superficie específica también aumenta considerablemente, sobre todo a partir del quinto ciclo, llegándose en el octavo ciclo a un valor superior en más de un 50 % al de la muestra sin tratar.

Es decir, parece confirmarse que el tratamiento de la arcilla a base de secados y amasados sucesivos produce una desagregación de las partículas arcillosas, lo que se traduce en un aumento del número de superficies reactivas accesibles y por tanto de la plasticidad del material. Pusch (1994) señala que con el calentamiento de la montmorillonita los granos se rompen y aumenta el número de apilamientos individuales de poco espesor, y por lo tanto la cantidad de dobles capas difusas, produciéndose una homogeneización de la microestructura. Tsige (1999), en su Tesis Doctoral, concluye que los ciclos de humedad/sequedad que se producen en terrenos arcillosos excavados, como consecuencia de la percolación de agua de lluvia y de la evaporación, conducen a un aumento del desmoronamiento y a la separación de los agregados, debido a la variación de las presiones internas y al debilitamiento de los enlaces electroquímicos.

El estudio al microscopio electrónico de esta bentonita –realizado en colaboración con el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona)– revela que la microestructura más frecuente está constituida por apilamientos de láminas de esmectita que parecen pseudomorfizar granos minerales originales de la roca volcánica, según se muestra en la Figura 55 y con más detalle en la Figura 56. En ellos, las láminas de esmectita se desarrollan perpendicularmente a lo que parecen ser lineaciones del mineral precursor, apareciendo de forma mucho más ordenada de lo que es habitual en materiales arcillosos. Estos apilamientos, cuya composición es puramente esmectítica, podrían ser responsables de la “rigidez” del material no tratado. Otro aspecto de la aparición de estas estructuras en el material se muestra en la Figura 57, en la que las lineaciones aparecen curvadas.



Figura 55: Fotografía a 1100 aumentos de la bentonita tomada al microscopio electrónico de barrido



Figura 56: Fotografía a 4500 aumentos de la bentonita tomada al microscopio electrónico de barrido

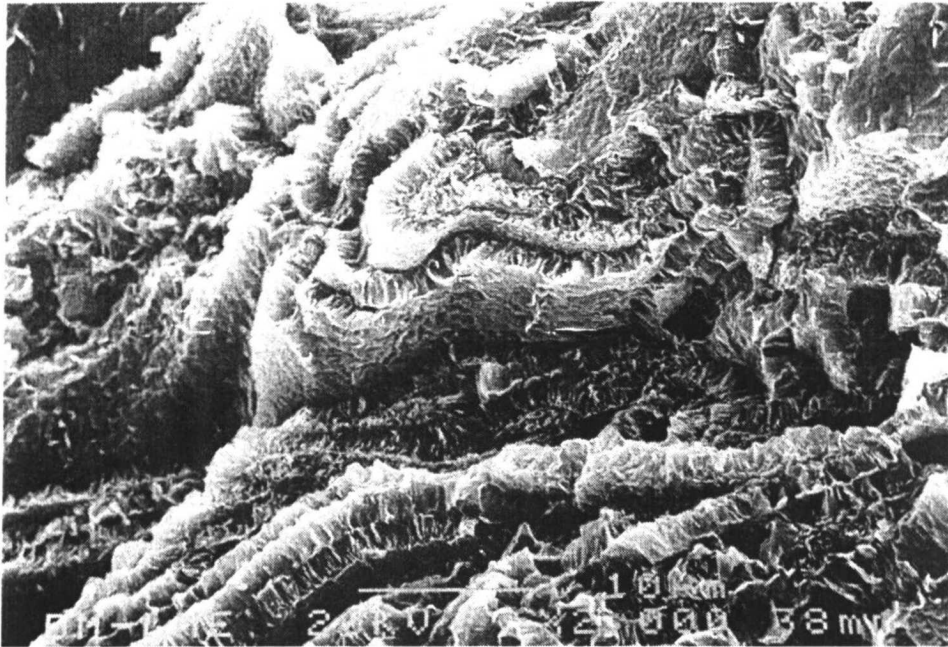


Figura 57: Fotografía a 2000 aumentos de la bentonita tomada al microscopio electrónico de barrido

Por otra parte, la sílice está presente en la bentonita, apareciendo frecuentemente bolas de cristobalita/tridimita y tapizados botroidales. Estos últimos podrían actuar como agentes cementantes, dificultando la dispersión de la arcilla (Figura 58).

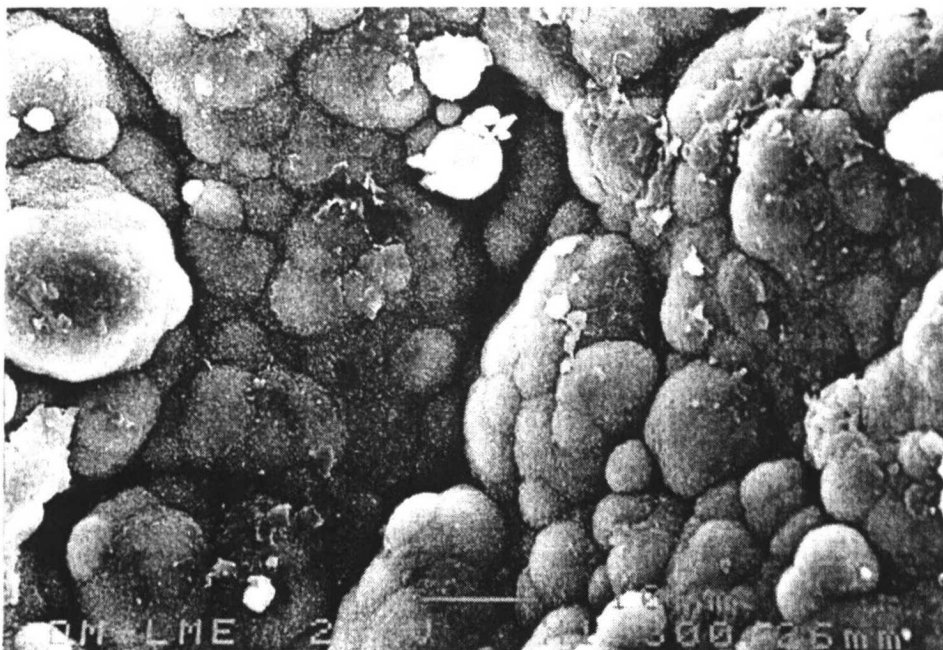


Figura 58: Tapiz botroidal de sílice en la bentonita. Fotografía tomada al microscopio electrónico de barrido a 1300 aumentos

Porosidad

El estudio de la microestructura de muestras de bentonita compactada en un intervalo de densidades secas de entre 1,67 y 1,78 g/cm³ se ha realizado mediante porosimetría de intrusión de mercurio. Esta técnica permite la determinación de la distribución de tamaños de poro mediante la inyección de mercurio en la muestra a diferentes presiones mientras se controla el volumen intruido. La presión aplicada puede relacionarse con el diámetro de poro mínimo intruido teniendo en cuenta las características del fluido. La relación entre el volumen de mercurio intruido (volumen de poros) y la presión aplicada (que condiciona el diámetro mínimo de poro) permite obtener curvas acumuladas que determinan el volumen de poros mayores de determinado tamaño y curvas de distribución que establecen el porcentaje de poros de tamaño comprendido en un intervalo.

Para este trabajo se ha utilizado un porosímetro Poresizer 9320 de Micromeritics con un intervalo de presión de inyección de mercurio de 7 kPa a 210 MPa, lo que permite medir diámetros de poro de entre 200 y 0,006 μm aproximadamente. Por lo tanto, el mercurio no llega a intruir la microporosidad (poros de tamaño inferior a 0,002 μm , según la clasificación de Sing et al. 1985). Antes de introducir las muestras en el porosímetro se ha eliminado el agua de los poros mediante liofilización. Los datos obtenidos se dan de acuerdo con la siguiente clave (Tuncer 1988):

- e_1 : índice de poros medido experimentalmente por inmersión en mercurio (Norma UNE 7045).
- e_2 : índice de poros calculado de acuerdo a la intrusión de mercurio en el porosímetro (o índice de poros aparente, e^*).
- % total: porcentaje total de poros intruido por mercurio.
- ϕ medio (μm): diámetro de poros medio.
- % grandes, medianos o pequeños: porcentaje de poros grandes (diámetro mayor de 6 μm), medianos (diámetro de entre 6 y 0,2 μm) o pequeños (diámetro de entre 0,2 y 0,006 μm) respecto al volumen total de poros intruidos. Esta clasificación de tamaños se ha hecho atendiendo a los resultados porosimétricos obtenidos en un gran número de

muestras de arcilla FEBEX analizadas, y abarca sólo la macro y la mesoporosidad. Los límites entre familias pueden variar ligeramente entre diferentes muestras.

- moda de poros grandes, medios o pequeños (μm).
- coef. unif.: coeficiente de uniformidad de poros ϕ_{40}/ϕ_{80} .

El estudio porosimétrico se ha realizado sobre bloques de los compactados para el ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX, obtenidos por compactación uniaxial del granulado de arcilla a presiones de entre 40 y 50 MPa (*cf.* sección “El Proyecto FEBEX”). Se hizo un muestreo de estos bloques para determinar su densidad, humedad y distribución porosimétrica en 15 posiciones diferentes dentro del bloque (las 5 posiciones marcadas sobre la superficie del bloque en la Figura 59, repetidas en la parte superior, media y central del bloque).

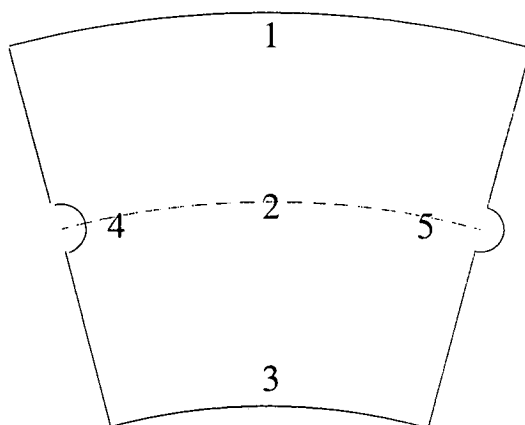


Figura 59: Distribución de las posiciones de muestreo (de 1 a 5) sobre la superficie de un bloque

Tras comprobarse que no existían diferencias importantes entre las distintas posiciones de una misma sección, se decidió realizar la determinación de porosimetría sólo en tres muestras de cada bloque, situadas en la parte superior central, media central e inferior

central del bloque (posición 2 de la Figura 59). Estos tres niveles presentan ciertas diferencias en la densidad seca, que es mayor en la parte superior del bloque, debido al rozamiento que se produce con las paredes del molde durante la compactación. Los datos de este estudio se pueden encontrar en el Anexo VI y se sintetizan en la Tabla XI (Villar 1997).

La Figura 60 muestra una curva porosimétrica típica de tres muestras compactadas de bentonita FEBEX pertenecientes a cada una de las tres secciones (superior, media e inferior), en la que se aprecian las tres familias principales de poros (grandes, medianos y pequeños), y cómo el método de intrusión de mercurio sólo permite acceder a la macroporosidad y a parte de los mesoporos. Al tratarse de una curva de porcentaje de incrementos de volumen de poro entre dos escalones de presión de inyección consecutivos, los diámetros a que está referida se calculan como el promedio entre los diámetros correspondientes a los dos escalones. Los poros grandes se analizan en la unidad de baja presión del porosímetro, y los de diámetro inferior a 6 μm en la unidad de alta presión.

Tabla XI: Datos de la porosimetría por intrusión de mercurio en la parte superior, media e inferior de los bloques muestreados

	SUPERIOR	MEDIA	INFERIOR	TOTAL
Nº muestras	15	15	15	45
ρ_d (g/cm³)	1,73±0,01	1,72±0,03	1,68±0,19	1,71±0,11
e₁	0,593±0,110	0,570±0,033	0,640±0,281	0,599±0,168
e₂	0,201±0,058	0,183±0,045	0,193±0,088	0,192±0,065
% total	35±11	32±7	34±17	33±12
Diám. medio (μm)	0,06±0,06	0,04±0,04	0,04±0,04	0,04±0,04
% grandes	24±7	23±7	23±5	23±6
Moda grandes (μm)	17±5	18±8	20±12	18±4
% medios	23±7	22±7	22±5	26±6
Moda medios (μm)	0,76±0,58	0,90±0,78	0,60±0,06	0,76±0,56
% pequeños	53±12	55±12	55±6	54±10
Moda pequeños (μm)	0,018±0,010	0,019±0,040	0,014±0,004	0,016±0,006
Coef. unif.	36±26	42±34	44±33	41±31

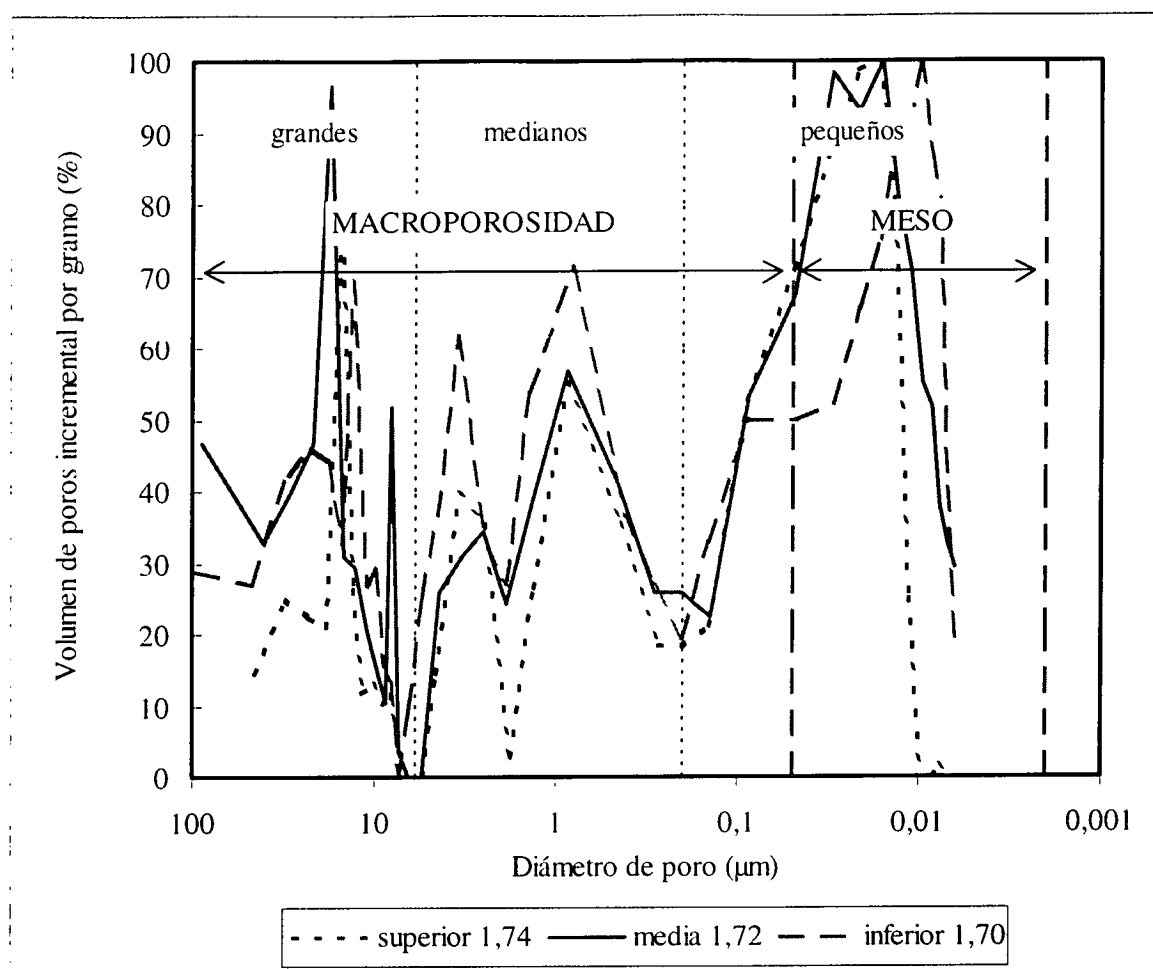


Figura 60: Curva porosimétrica incremental de muestras procedentes de diferentes secciones (superior, media e inferior) de bloques de bentonita FEBEX, con indicación de la densidad seca en g/cm^3

El estudio porosimétrico no muestra variaciones significativas entre las distintas posiciones dentro de un mismo bloque. Se observa cómo el porcentaje de porosidad intruido por el mercurio es bastante bajo (33 % en promedio), lo que significa que existe un importante volumen de poros (67 %) cuyo tamaño es inferior a $0,006 \mu\text{m}$ (límite de acceso del equipo) o bien, que no están intercomunicados. Teniendo esto en cuenta, se puede recalcular el porcentaje de poros de cada intervalo de tamaño, obteniéndose los valores medios, sólo orientativos, que se muestran en la Tabla XII. Esta distribución corresponde a la muestra con su humedad higroscópica, y puede no coincidir con la de la muestra saturada, puesto que al ser un material reactivo el diámetro de los poros varía con la humedad. En la Tabla XI se aprecia también que es bajo el coeficiente de uniformidad, puesto que existe un claro predominio de los poros pequeños.

Tabla XII: Distribución orientativa de la porosidad total para la bentonita FEBEX con su humedad higroscópica

Intervalo de tamaño (μm)	Volumen (porcentaje)
> 6	7
6 - 0,2	8
0,2 - 0,006	18
< 0,006	67

La Figura 61 muestra la distribución de los tamaños de poros obtenida para la parte superior, media e inferior de los bloque muestreados.

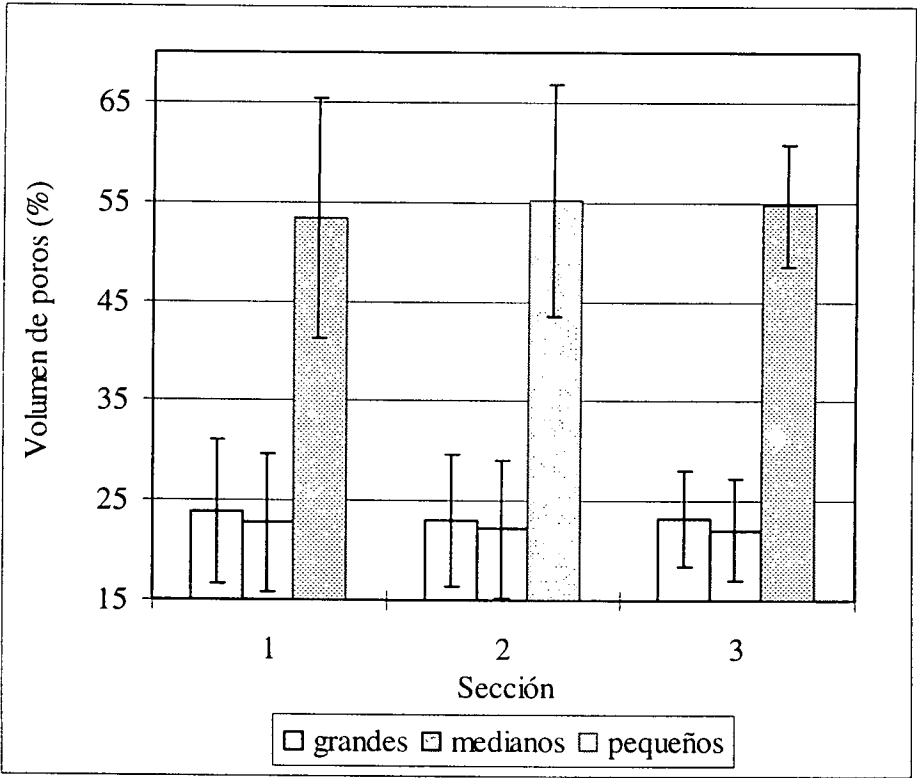


Figura 61: Distribución de los tamaños de poros grandes (> 6 μm), medianos (entre 6 y 0,15 μm) y pequeños (entre 0,15 y 0,006 μm) en la parte superior (1), media (2) e inferior (3) de los bloques muestreados, obtenida por intrusión de mercurio

La Figura 62 muestra las mismas curvas de la Figura 60 expresadas en porcentaje acumulado de volumen de poros en función del diámetro de los mismos. Esta figura incluye también las curvas de extrusión de mercurio, es decir, de expulsión del mercurio

contenido en la muestra al liberarse gradualmente la presión de inyección aplicada. Durante la intrusión se llena de mercurio todo el espacio accesible e interconectado, por lo que la curva de intrusión da la distribución de la porosidad total accesible al mercurio. Sin embargo, cuando se relaja la presión de inyección, sólo sale el mercurio que está en poros no constreñidos, y el resto queda retenido por puentes de arcilla que se forman debido a la conformación irregular de los agregados que actúan como cuellos de botella (Romero 1999). Entre un 73 y un 83 % del mercurio que intruyó queda retenido dentro de la bentonita FEBEX. Algunos autores sugieren que esta diferencia entre el volumen intruido y extruido equivale a la porosidad inter-agregado, y que el tamaño de entrada de poro correspondiente a este porcentaje en la curva de intrusión marca el límite entre porosidad inter-agregado e intra-agregado (Romero 1999, Romero et al. 1999). A partir de las curvas de intrusión-extrusión que se muestran en la Figura 62, este valor de diámetro de poro estaría entre 0,01 y 0,02 μm , que es del mismo orden de magnitud que el límite entre macro y mesoporosidad que establecen Sing et al. (1985), 0,05 μm . Este tamaño de poro parece demasiado grande para definir el límite de porosidad intra-agregado, puesto que los poros intra-agregado en un material arcilloso se considera que tienen tamaños inferiores a 0,002 μm (sección “CARACTERÍSTICAS DE LAS ESMECTITAS”). Esta falta de correlación entre el valor teórico y el obtenido mediante intrusión de mercurio puede ser debida al pequeño porcentaje de porosidad total que es en realidad intruido, así como al hecho de que, en la bentonita FEBEX, los pseudomorfo de granos minerales pueden actuar como agregados, siendo la porosidad en su interior mayor que la que puede aparecer en agregados constituidos por partículas originalmente arcillosas. Teniendo en cuenta que sólo un 33 % de la porosidad total es accedida en promedio por el mercurio (*cf.* “% total” en Tabla XI), la porosidad inter-agregado (mayor que 0,01-0,02 μm) supondría entre un 22 y un 27 % del total de porosidad, correspondiendo el resto a poros intra-agregado.

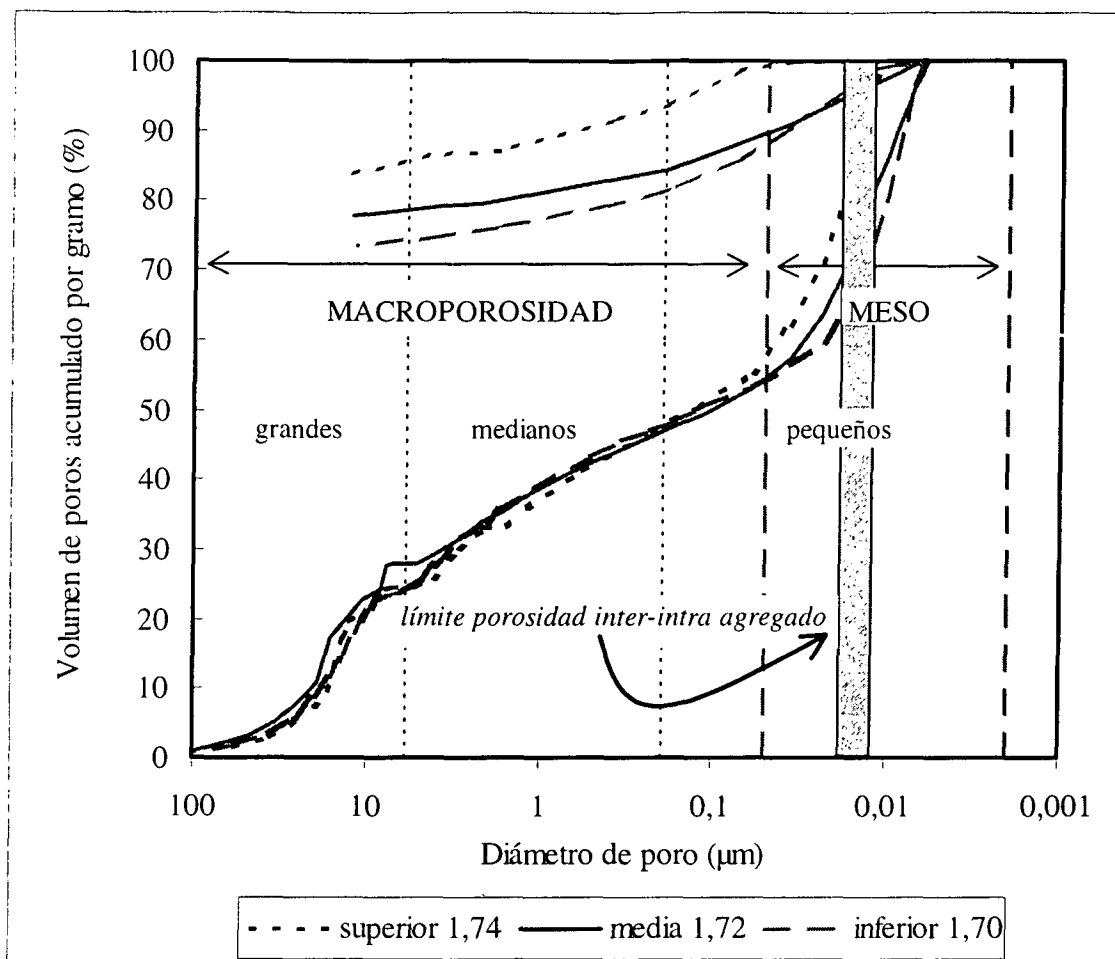


Figura 62: Curva porosimétrica (intrusión y extrusión) de muestras procedentes de diferentes secciones (superior, media e inferior) de bloques de bentonita FEBEX, con indicación de la densidad seca en g/cm^3

DENSIDAD DEL AGUA

En las secciones que siguen a continuación se constatará que, con frecuencia, el grado de saturación de la arcilla al final de ensayos en los que la muestra se satura a volumen constante –calculado a partir de su densidad, humedad y peso específico de las partículas sólidas–, resulta mayor del 100%. Se trata concretamente de los ensayos de permeabilidad, presión de hinchamiento, saturación bajo carga y curvas de retención a volumen constante. De éstos, los tres últimos tipos se realizan en edómetro. En general, la diferencia con el valor de 100 % aumenta con la densidad seca, haciéndose particularmente notable para densidades secas superiores a $1,60 \text{ g/cm}^3$. Se han analizado diversas causas que pudieran

explicar esta anomalía, encontrándose que los siguientes factores pueden tener cierta contribución:

- Deficiente determinación del peso específico que, de ser mayor al que se ha considerado ($2,70 \text{ g/cm}^3$), daría lugar a grados de saturación menores. Para que los grados de saturación se aproximaran a un valor medio de 105 % el peso específico debería superar el improbable valor de $2,90 \text{ g/cm}^3$. Aún así, los ensayos a mayor densidad seca seguirían finalizando con grados de saturación calculados de entre 110 y 120 %.
- Error en la determinación de la humedad final. En concreto, en los ensayos en edómetro, si no se vacía la celda de agua antes de la descarga, la muestra podría tomar agua durante la descompresión, dando lugar a un valor de humedad final mayor al que realmente tenía al finalizar el ensayo. Dada la rapidez con que se realiza el proceso de desmontaje y la baja permeabilidad de la arcilla no se considera que la modificación pueda ser significativa.
- Inexactitud en la medida de la altura de la muestra colocada en las celdas, lo que podría dar lugar al cálculo de densidades secas mayores que las reales y por tanto de grados de saturación magnificados. En el caso de los ensayos de permeabilidad, el hinchamiento de la arcilla podría producir el estiramiento de las tapas de la celda, permitiendo cierta expansión no detectada de la muestra. En el caso de los ensayos en edómetro esto podría suceder bien por fallos del comparador, del tarado del equipo o por sobrepasar el límite de carga para el que el equipo está diseñado. Aunque se ha procurado evitar esto –verificando los comparadores y aplicando a la medida el factor de corrección del tarado realizado en las mismas condiciones del ensayo– podría contribuir en cierta medida a la obtención de grados de saturación no exactos, pero nunca tan grandes como los observados. Por ejemplo, para que en los ensayos de presión de hinchamiento el grado de saturación final fuera del 100 %, fijando la humedad final, habría que disminuir la densidad seca de la muestra determinada a partir de la lectura del comparador un 5,6 % en promedio, llegando al 10 % para las densidades secas más altas. Sin embargo, se ha comprobado que, incluso si se calcula la densidad seca final a partir de la altura de la muestra una vez

extraída de la celda al finalizar el ensayo –que siempre será menor que la densidad de la muestra en el edómetro, puesto que al descargarla para desmontarla se produce su relajación elástica por descompresión–, se obtienen también grados de saturación de 105 % en promedio, llegando hasta 110 %. Por tanto, si se quisiera subsanar la cuestión corrigiendo las densidades secas hasta que el grado de saturación se ajustase a 100 %, habría que llegar a valores de densidad inferiores a los que se han constatado experimentalmente, es decir, inaceptables.

De lo expuesto se concluye que, aunque varios factores pueden dar lugar a la obtención de grados de saturación ficticios algo superiores a 100 %, no llegan a justificar los elevados valores calculados.

Por otra parte, el cálculo de los grados de saturación se realiza sistemáticamente atribuyendo un valor de $1,00 \text{ g/cm}^3$ a la densidad del agua. Sin embargo, diversos autores han señalado que en la proximidad de las láminas de arcilla la estructura de las moléculas de agua está perturbada y sus propiedades difieren de las del agua libre (Sposito & Prost 1982). Esta modificación de las propiedades del agua adsorbida se hace más notable para los contenidos bajos de humedad. En concreto, para la densidad del agua adsorbida en montmorillonita, Martin (1962) recoge datos de otros autores obtenidos mediante picnómetro y difracción de rayos X, entre los que se encuentran valores de $1,32 \text{ g/cm}^3$ para humedad de la arcilla del 28 %, $1,37 \text{ g/cm}^3$ para humedad del 17 % y $1,41 \text{ g/cm}^3$ para humedad del 12 %. Pusch et al. (1990) encuentran en sus estudios que la densidad del agua en la montmorillonita sódica a diferentes densidades tiene un valor máximo de $1,05 \text{ g/cm}^3$, dependiendo del grado de ordenamiento y de la presencia de moléculas de agua intersticial. En otros materiales se ha constatado también la variación de la densidad del agua con la humedad, llegando a medirse valores de $1,48 \text{ g/cm}^3$ en la harina de trigo (Multon et al. 1981).

Teniendo esto presente se ha calculado la densidad que debería tener el agua para que el grado de saturación se ajustase a 100 % en cada uno de los ensayos realizados. La Figura 63 muestra los valores hipotéticos de densidad del agua en función de la humedad de la arcilla para ensayos de diferente tipo incluidos en este trabajo. Se observa cómo a medida que la humedad de la arcilla disminuye, la densidad del agua aumenta, hasta alcanzar

valores próximos a $1,36 \text{ g/cm}^3$. Aunque el aumento puede no llegar a ser tan alto en realidad, si se tiene en cuenta que los grados de saturación calculados podrían estar algo exagerados por los factores que se han indicado más arriba, los valores obtenidos están en el orden de los recogidos por Martin (1962), según se muestra en la misma figura.

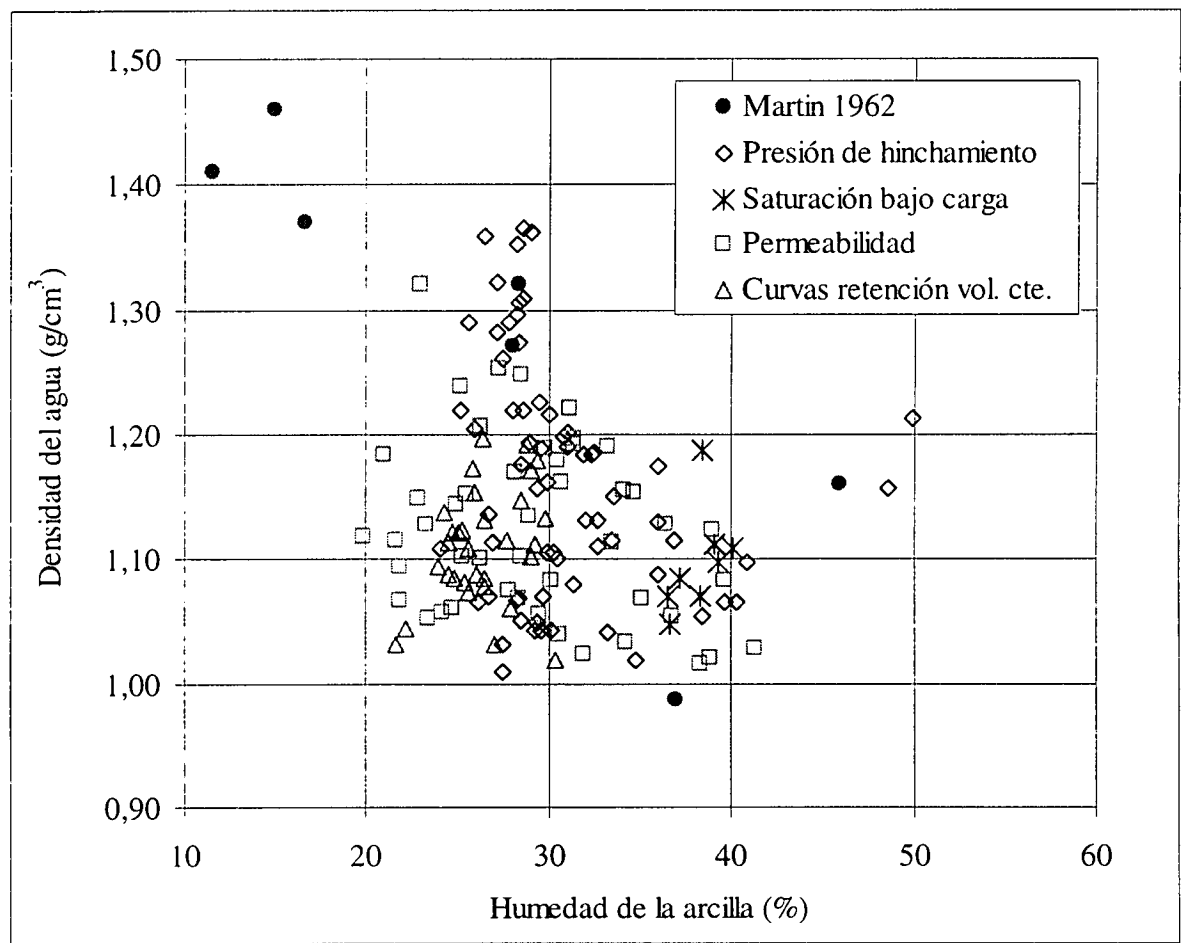


Figura 63: Densidad del agua calculada para mantener el grado de saturación de la arcilla en el 100 % para diferentes tipos de ensayos y valores experimentales recogidos en Martin (1962)

La dispersión observada en la Figura 63 supone que con el mismo valor de humedad han alcanzado la saturación muestras de diferente densidad. Esto puede deberse a diversos factores, entre los que cabe citar la temperatura del ensayo, su duración y los errores experimentales en la determinación de la densidad seca y de la humedad de la arcilla. Además, la presión del agua intersticial puede tener influencia en la cantidad de agua que puede introducirse en el espacio interlaminar (Pusch et al. 1990), lo que podría tener

repercusión en la humedad final de los ensayos de permeabilidad, en los que el agua se inyecta a diferentes presiones.

Para aminorar el efecto de esta dispersión se han agrupado todos los datos de muestras saturadas a volumen constante en función de su densidad seca, por intervalos de 0,05 g/cm³, hallando los valores medios de humedad y de densidad del agua adsorbida correspondientes a cada intervalo de densidad. Se han utilizado los datos de 150 ensayos de permeabilidad, presión de hinchamiento, saturación bajo carga y curva de retención a volumen constante, en todos los cuales se ha saturado la muestra a volumen constante con agua destilada. Los valores medios obtenidos se recogen en la Tabla XIII y se representan en la Figura 64.

Tabla XIII: Valores de densidad del agua adsorbida calculados para muestras de arcilla de diferente densidad seca (ρ_d) saturadas a volumen constante con agua destilada

ρ_d (g/cm ³)	Humedad (%)	Densidad agua (g/cm ³)
1,28	44,3	1,094
1,34	39,7	1,053
1,37	39,1	1,085
1,42	36,0	1,093
1,47	33,6	1,088
1,52	31,0	1,087
1,58	29,7	1,128
1,62	28,0	1,141
1,67	26,1	1,152
1,71	26,1	1,225
1,76	23,7	1,201
1,83	21,2	1,207

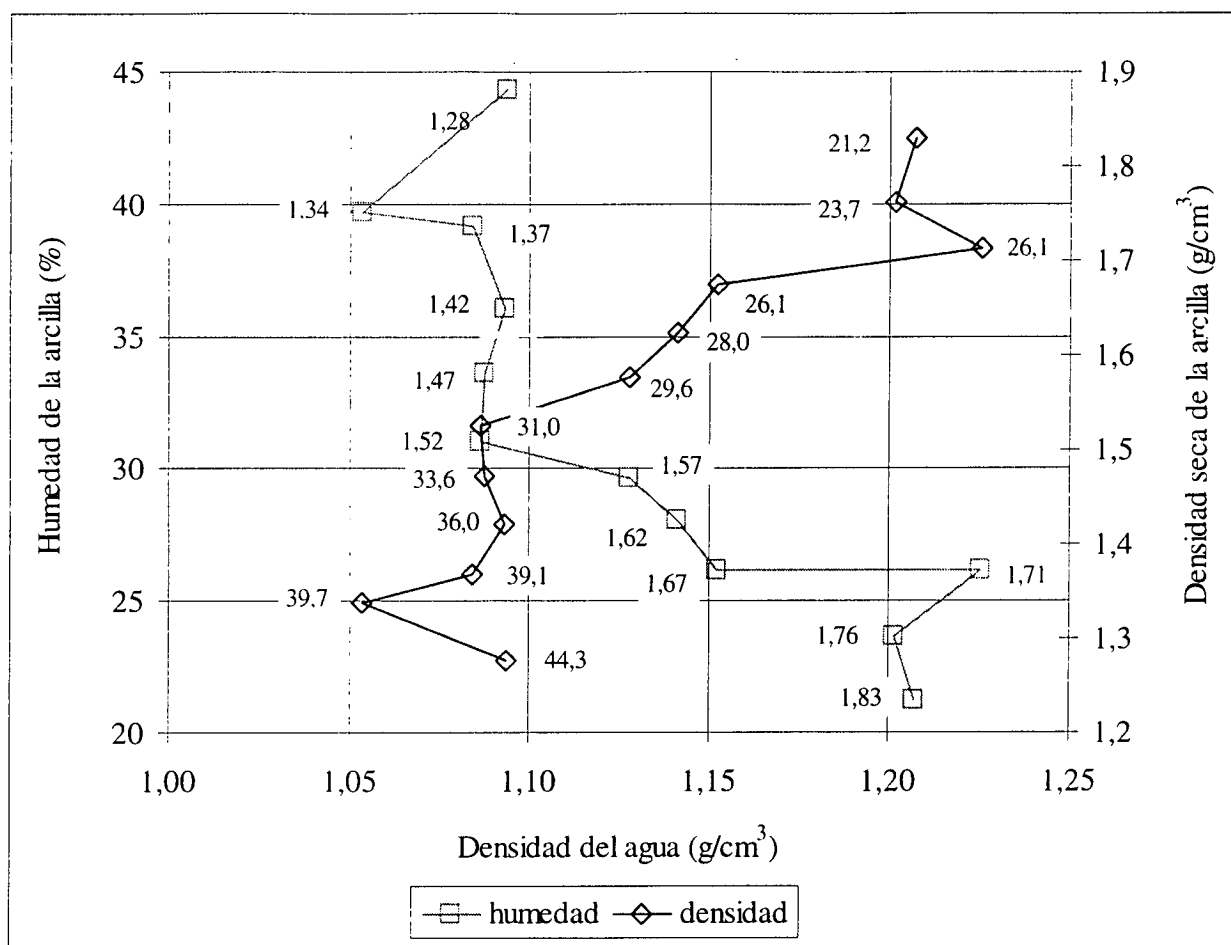


Figura 64: Valores de densidad del agua adsorbida calculados para muestras de arcilla de diferente densidad seca saturadas a volumen constante con agua destilada

Se han determinado los coeficientes de correlación entre los valores medios de la densidad seca de la arcilla, la humedad de la arcilla y la densidad del agua calculada para que el grado de saturación se ajuste a 100 % (Tabla XIII). Esto ha mostrado que la mayor repercusión sobre la densidad del agua la tiene en realidad la densidad seca de la muestra (aunque lógicamente cuánto mayor es la densidad seca menor es la humedad de saturación), estando ambas directamente relacionadas. Por tanto, la modificación de la densidad del agua podría estar determinada no sólo por la humedad de la arcilla, sino también por su porosidad, puesto que la disminución del tamaño de los poros al aumentar la densidad seca podría dificultar el desarrollo de las dobles capas difusas. Por supuesto, esto se refiere al caso en el que la arcilla se satura a volumen constante, impidiéndose la expansión que de otra forma se produciría.

Lo mostrado en esta sección constituye únicamente una justificación a la obtención de grados de saturación mayores de 100 % cuando éstos se calculan considerando la densidad del agua como la del agua libre ($1,00 \text{ g/cm}^3$). Según se ha comprobado, esto no es correcto, y para hacerlo notar se utiliza en lo que sigue el símbolo S_r^* para referirse al grado de saturación calculado de esta manera. Sin embargo, la experimentación recogida en este trabajo no estaba dirigida específicamente a determinar la densidad del agua adsorbida, lo que unido a la dispersión de los datos y a que sólo se refieren a muestras saturadas, hace que no sea posible dar valores concretos de la variación de la densidad del agua con la densidad y la humedad de la arcilla. Por este motivo los grados de saturación se han calculado, como es la práctica habitual en geotecnia, suponiendo una densidad del agua adsorbida igual a la del agua libre (S_r^*).

CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

Conductividad hidráulica

Las determinaciones de conductividad hidráulica se han realizado según el método descrito en la sección “CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA”, que se puede encontrar más detallado en el Anexo I. Durante la determinación la muestra permanece en una celda cilíndrica de acero inoxidable de 5,0 cm de diámetro y 2,5 cm de altura. Antes de realizar la medida las muestras se saturan inyectando agua a presión de 0,6 MPa por su parte superior e inferior, durante un tiempo entre una semana y un mes, dependiendo de la densidad de la pastilla. A continuación se aplica un gradiente hidráulico, mediante aumento de la presión de inyección en la parte inferior, y se mide el volumen de agua que atraviesa la pastilla en función del tiempo. Aplicando la ley de Darcy se calcula el coeficiente de permeabilidad.

La determinación se realiza para varias cargas hidráulicas, siempre inferiores a la presión de hinchamiento de la muestra, sin que la utilización de una u otra suponga variaciones significativas en el coeficiente de permeabilidad obtenido. Este aspecto se discute con más

detalle en la sección “Influencia de la carga hidráulica aplicada”. Todos los ensayos están hechos a la temperatura del laboratorio, entre 20 y 25 °C.

Se han realizado medidas para un amplio intervalo de densidades. Así mismo, se ha comprobado la influencia de la dirección en que se realiza la medida respecto a la dirección de compactación de la muestra. Se ha estudiado también la repercusión del tipo de agua utilizado como permeante. Cada uno de estos aspectos se presenta por separado en las siguientes secciones.

Variación en función de la densidad seca

Se ha determinado la conductividad hidráulica en pastillas cilíndricas de diferente densidad compactadas uniaxialmente en el interior de la celda de permeabilidad a partir de la arcilla con su humedad higroscópica. El intervalo de densidades secas estudiadas está entre 1,30 y 1,84 g/cm³. Se ha utilizado agua destilada como permeante.

Los valores medios obtenidos en las diferentes determinaciones se reflejan en la Tabla XIV, incluyendo la densidad seca, la humedad inicial y final y el grado de saturación final. El grado de saturación final de cada ensayo está calculado considerando la densidad del agua igual a 1,00 g/cm³, como es habitual en geotecnia. Por este motivo aparecen valores superiores al 100 %, ya que la densidad del agua adsorbida en la esmectita varía en función de la densidad seca y de la humedad de la arcilla, como se discute en la sección “DENSIDAD DEL AGUA”.

A partir de estos valores de permeabilidad al agua de la muestra saturada (k_w), puede calcularse la permeabilidad intrínseca (k_{iw}) correspondiente a cada determinación, mediante la expresión

$$k_{iw} = \frac{k_w \times \mu}{\rho \times g}$$

en la que μ y ρ son la viscosidad y la densidad del agua y g es la aceleración de la gravedad. Para estos parámetros se han tomado valores de 10⁻³ Pa·s, 10³ kg/m³, y 9,81 m/s², respectivamente, puesto que las determinaciones se han realizado a una temperatura

media de 20 °C. Se ha comprobado que el hecho de no introducir en el cálculo la variación de la densidad y viscosidad del agua con la humedad y la densidad de la arcilla no supone una repercusión importante sobre el valor de permeabilidad intrínseca obtenido, dado que el rango de variación de estas propiedades es pequeño. Los valores de permeabilidad intrínseca deducidos se muestran también en la Tabla XIV.

Tabla XIV: Resultados de los ensayos de conductividad hidráulica con agua destilada

ρ_d (g/cm ³)	e	w inicial (%)	w final (%)	S_r^* final (%)	k_w (m/s)	k_{iw} (m ²)
1,30	1,084	14,3	41,3	103	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-19}$
1,34	1,019	13,6	38,3	102	$7,6 \cdot 10^{-13}$	$7,7 \cdot 10^{-20}$
1,36	0,988	14,4	39,6	108	$7,2 \cdot 10^{-13}$	$7,3 \cdot 10^{-20}$
1,39	0,938	13,8	39,0	112	$3,5 \cdot 10^{-13}$	$3,6 \cdot 10^{-20}$
1,43	0,894	14,0	34,2	103	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$2,3 \cdot 10^{-20}$
1,43	0,886	12,4	35,1	107	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$2,2 \cdot 10^{-20}$
1,44	0,874	14,7	36,5	113	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$2,0 \cdot 10^{-20}$
1,47	0,841	13,7	31,9	102	$1,0 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-20}$
1,50	0,797	14,4	34,1	116	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-20}$
1,50	0,795	13,9	30,6	104	$8,2 \cdot 10^{-14}$	$8,3 \cdot 10^{-21}$
1,54	0,752	14,7	29,4	106	$4,1 \cdot 10^{-14}$	$4,2 \cdot 10^{-21}$
1,58	0,709	14,0	31,3	119	$8,3 \cdot 10^{-14}$	$8,5 \cdot 10^{-21}$
1,59	0,698	14,8	30,5	118	$3,1 \cdot 10^{-14}$	$3,2 \cdot 10^{-21}$
1,59	0,698	12,5	28,5	110	$6,4 \cdot 10^{-14}$	$6,5 \cdot 10^{-21}$
1,60	0,688	15,0	31,1	122	$5,9 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-21}$
1,60	0,688	13,3	28,9	113	$6,0 \cdot 10^{-14}$	$6,1 \cdot 10^{-21}$
1,61	0,677	11,7	29,8	119	$5,9 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-21}$
1,64	0,644	14,7	26,2	110	$2,8 \cdot 10^{-14}$	$2,8 \cdot 10^{-21}$
1,67	0,617	14,5	28,5	125	$3,7 \cdot 10^{-14}$	$3,8 \cdot 10^{-21}$
1,69	0,598	11,7	25,5	115	$3,2 \cdot 10^{-14}$	$3,3 \cdot 10^{-21}$
1,70	0,587	14,3	24,9	114	$2,2 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-21}$
1,70	0,588	14,8	21,3	98	$3,8 \cdot 10^{-14}$	$3,9 \cdot 10^{-21}$
1,70	0,588	15,1	20,7	95	$2,9 \cdot 10^{-14}$	$3,0 \cdot 10^{-21}$
1,70	0,588	13,4	26,3	121	$3,8 \cdot 10^{-14}$	$3,9 \cdot 10^{-21}$

ρ_d (g/cm ³)	e	w inicial (%)	w final (%)	S_r^* final (%)	k_w (m/s)	k_{iw} (m ²)
1,70	0,588	11,9	27,3	125	$4,1 \cdot 10^{-14}$	$4,2 \cdot 10^{-21}$
1,73	0,558	14,3	23,3	113	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$1,8 \cdot 10^{-21}$
1,74	0,547	13,8	25,1	124	$3,0 \cdot 10^{-14}$	$3,0 \cdot 10^{-21}$
1,75	0,540	15,5	21,9	109	$5,8 \cdot 10^{-15}$	$5,9 \cdot 10^{-22}$
1,76	0,536	15,2	22,8	115	$1,2 \cdot 10^{-14}$	$1,2 \cdot 10^{-21}$
1,77	0,524	15,8	21,6	112	$9,6 \cdot 10^{-15}$	$9,8 \cdot 10^{-22}$
1,83	0,477	13,0	20,9	118	$1,1 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-21}$
1,83	0,478	14,4	19,8	112	$4,2 \cdot 10^{-15}$	$4,3 \cdot 10^{-22}$
1,84	0,470	14,2	23,0	132	$2,6 \cdot 10^{-14}$	$2,6 \cdot 10^{-21}$

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

En la Figura 65 se representan en función de la densidad seca todos los valores obtenidos. Las variaciones de la permeabilidad en función de la densidad seca de la muestra son importantes, produciéndose una clara disminución de la permeabilidad al aumentar la densidad. La mayor dispersión observada entre los valores correspondientes a densidades elevadas es probablemente debida a la dificultad de su determinación, ya que, dada la baja permeabilidad de la bentonita, muy acentuada por el aumento de densidad, los flujos de agua son muy pequeños y su medida se hace difícil, siendo necesario aumentar el gradiente hidráulico para que puedan ser medibles con las técnicas disponibles.

Los valores de conductividad hidráulica (k_w , m/s) se relacionan con la densidad seca (ρ_d , g/cm³) de forma exponencial, pudiendo distinguirse dos ajustes diferentes –que también se muestran en la figura– según el intervalo de densidad:

para densidades secas inferiores a 1,47 g/cm³:

$$\log k_w = -6,00 \rho_d - 4,09 \quad (r^2 = 0,97, 8 \text{ puntos})$$

para densidades secas superiores a 1,47 g/cm³:

$$\log k_w = -2,96 \rho_d - 8,57 \quad (r^2 = 0,70, 26 \text{ puntos})$$

Para cada ensayo se ha calculado el valor teórico de la permeabilidad según estos ajustes (k_{wt}) así como la desviación en porcentaje de este valor teórico respecto al experimental (k_w de la Tabla XIV): $((k_w - k_{wt})/k_{wt}) \times 100$. La variación de los valores experimentales respecto a estos ajustes es más pequeña para las densidades bajas que para las altas, con un promedio –en valor absoluto– del 30 %, lo que debe evaluarse teniendo en cuenta que los valores de permeabilidad son del orden de 10^{-13} m/s. Este porcentaje de desviación está también indicado en la Figura 65.

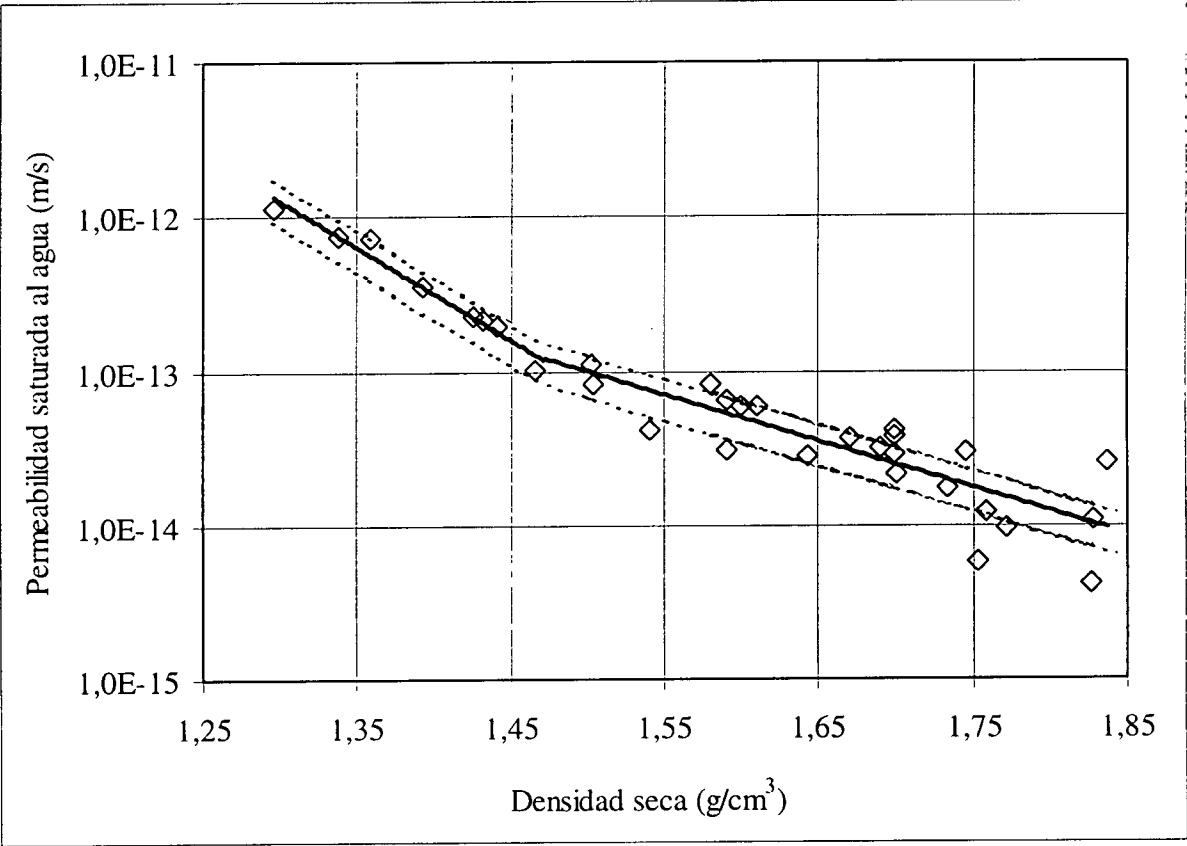


Figura 65: Permeabilidad al agua destilada en función de la densidad seca de la arcilla y ajustes obtenidos, junto con el rango de variación medio de los valores experimentales respecto a los teóricos

Este valor “umbral” en torno a $1,47 \text{ g/cm}^3$ separa dos intervalos de densidad para los que el comportamiento hidráulico de la arcilla es algo diferente, ya que, para densidades por debajo de este valor, el aumento de permeabilidad al disminuir la densidad seca es más acusado.

Los valores de permeabilidad intrínseca obtenidos a partir de los ensayos de conductividad hidráulica (k_{iw} , m^2) se representan en función de la porosidad (n) en la Figura 66. La correlación entre ambas variables sigue una ley exponencial para porosidades entre 0,32 y 0,52, que se ajusta a las siguientes ecuaciones:

$$\log k_{iw} = 7,99 n - 23,55 \qquad \text{para } 0,32 < n < 0,46$$

$$\log k_{iw} = 16,21 n - 27,29 \qquad \text{para } 0,46 < n < 0,52$$

pudiendo distinguirse un umbral de porosidad que marca un incremento más brusco de la permeabilidad intrínseca al aumentar la porosidad. Este valor umbral coincide con el señalado para la conductividad hidráulica.

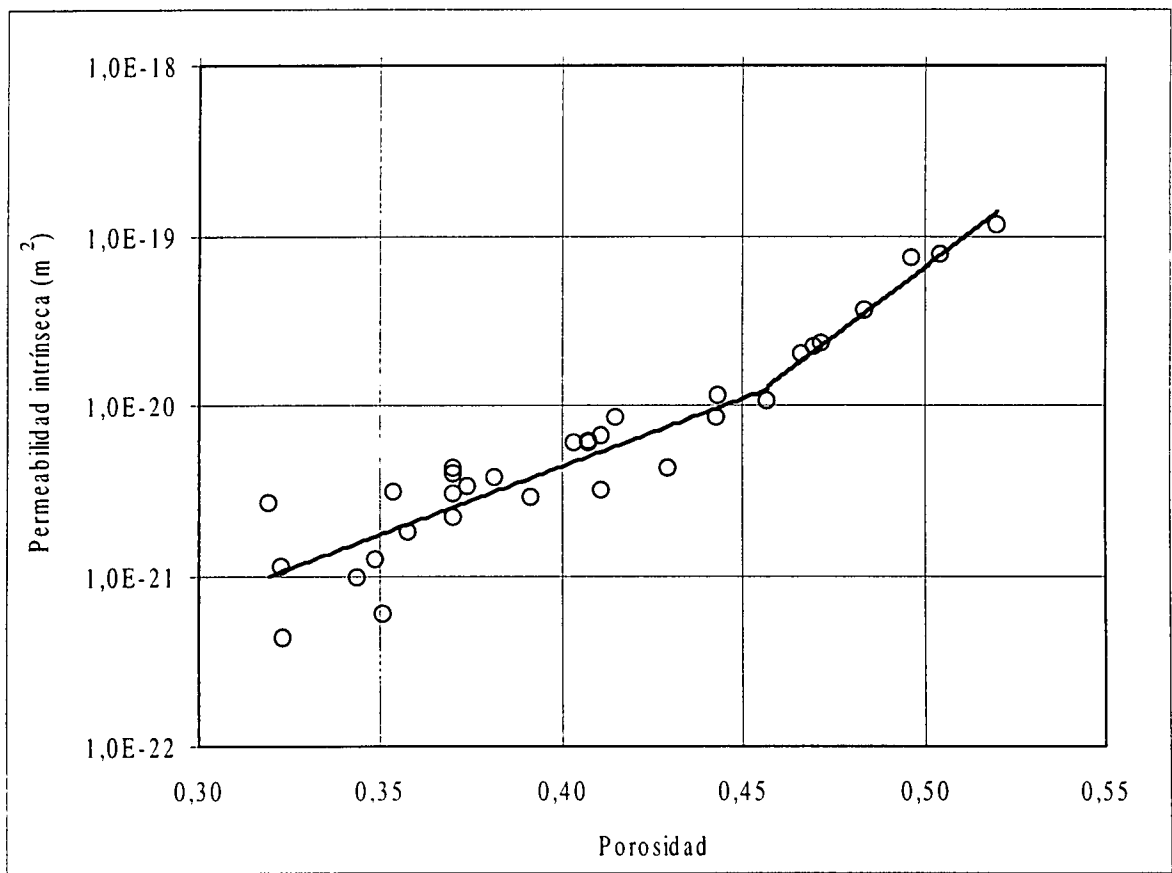


Figura 66: Variación de la permeabilidad intrínseca con la porosidad a partir de ensayos de conductividad hidráulica saturada

Pusch (1979) justifica la extremadamente baja permeabilidad de la bentonita compactada a alta densidad por las bajas humedades necesarias para saturar la arcilla muy compactada,

ya que en estas condiciones la película de agua interlaminar tiene muy poco espesor (3-5 Å) debido a su elevada superficie específica, y esto hace que las moléculas de agua estén fuertemente adsorbidas a las superficies de los minerales de arcilla, dejando sólo tortuosos pasajes interpartícula para el transporte de agua. Además, en la montmorillonita cálcica compactada a densidades secas superiores a $1,60 \text{ g/cm}^3$, más del 90 % del volumen total de poros está ocupado por esta agua interlaminar de movilidad restringida (Pusch et al. 1990).

Por otra parte, la relación entre conductividad hidráulica y porosidad (o densidad seca) es de tipo exponencial para gran variedad de materiales geológicos. Wilkinson & Shipley (1972) ajustan este tipo de ecuaciones a los resultados que obtienen al ensayar arcillas limosas, laminadas y orgánicas, y caolines. Geneste et al. (1990) encuentran una relación similar a las aquí expuestas entre densidad seca y conductividad hidráulica para la esmectita cálcica francesa denominada “FoCa”. Así pues, la relación encontrada en este trabajo entre conductividad hidráulica y densidad sigue las pautas indicadas por numerosos autores, acercándose más a la que señala Pusch (1979) para el caso de la bentonita sódica, en la que se distinguen dos tramos de densidad para los que el incremento de la conductividad hidráulica con la disminución de densidad es diferente. Villar & Rivas (1994) encuentran este umbral para la bentonita S-2 procedente del mismo yacimiento, y lo interpretan como provocado por la brusca disminución de la presión de hinchamiento para densidades menores que este valor, lo que ocasiona un aumento más notable del tamaño de los canales de flujo. Puesto que la permeabilidad intrínseca, y por tanto la conductividad hidráulica, está relacionada con el diámetro de poro mediante la ecuación de Poiseuille, el aumento del diámetro medio de los poros ocasionado por el menor hinchamiento a partir del valor umbral de densidad, da lugar al aumento más acusado de permeabilidad. La notable disminución de la presión de hinchamiento de la bentonita FEBEX para densidades secas inferiores a $1,47 \text{ g/cm}^3$ se hace patente en la Figura 99.

Studds et al. (1998) encuentran que la permeabilidad al agua destilada de la bentonita de Wyoming compactada a densidades mucho menores que las ensayadas en este trabajo (entre $1,35$ y $0,25 \text{ g/cm}^3$) sigue una relación potencial con el índice poros, lo que confirmaría el aumento brusco de permeabilidad por debajo de determinado umbral de densidad.

Variación en función del tipo de agua

Es un hecho aceptado que el tipo de agua utilizada como permeante, especialmente su salinidad, puede tener repercusión sobre el coeficiente de permeabilidad de un suelo (Klute 1965, Olsen 1962). Para comprobar este aspecto se ha realizado la determinación de la permeabilidad saturada de pastillas de diferente densidad compactadas con la humedad higroscópica de la arcilla, utilizando agua granítica o salina como permeante en lugar de agua destilada. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla XV para agua granítica y en la Tabla XVI para agua salina, en ambos casos junto con el valor de permeabilidad que correspondería a la densidad seca de cada muestra según los ajustes obtenidos para agua destilada presentados en la sección anterior. La columna “desviación” indica el porcentaje de desviación respecto al valor esperado para agua destilada, de manera que desviaciones negativas implican que la permeabilidad obtenida es menor que la teórica, y viceversa.

Tabla XV: Resultados de los ensayos de conductividad hidráulica realizados con agua granítica

ρ_d (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	S _r [*] final (%)	k _w (m/s)	k _w destilada (m/s)	Desviación %
1,36	13,9	39,0	107	$5,6 \cdot 10^{-13}$	$5,5 \cdot 10^{-12}$	2
1,38	15,8	37,7	106	$6,1 \cdot 10^{-13}$	$4,3 \cdot 10^{-13}$	41
1,41	13,8	36,8	109	$2,1 \cdot 10^{-13}$	$2,7 \cdot 10^{-13}$	-20
1,48	15,3	32,6	107	$1,2 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	9
1,52	16,0	31,0	107	$5,9 \cdot 10^{-14}$	$8,7 \cdot 10^{-14}$	-32
1,60	13,7	26,6	104	$2,3 \cdot 10^{-14}$	$5,1 \cdot 10^{-14}$	-55
1,65	14,3	30,2	127	$6,4 \cdot 10^{-14}$	$3,6 \cdot 10^{-14}$	78
1,69	14,8	24,3	111	$1,4 \cdot 10^{-14}$	$2,6 \cdot 10^{-14}$	-47
1,74	13,8	23,6	116	$1,5 \cdot 10^{-14}$	$1,9 \cdot 10^{-14}$	-18
1,80	15,3	21,2	114	$8,0 \cdot 10^{-15}$	$1,3 \cdot 10^{-14}$	-39

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla XVI: Resultados de los ensayos de conductividad hidráulica realizados con agua salina

ρ_d (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	S _r [*] final	k _w (m/s)	k _w destilada (m/s)	Desviación (%)
1,31	15,7	39,4	101	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	233
1,33	15,0	41,2	108	$9,7 \cdot 10^{-12}$	$8,4 \cdot 10^{-13}$	1062
1,39	12,9	35,0	100	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$3,9 \cdot 10^{-13}$	280
1,39	14,8	36,4	104	$3,5 \cdot 10^{-13}$	$3,7 \cdot 10^{-13}$	-5
1,45	13,5	33,3	104	$7,8 \cdot 10^{-13}$	$1,7 \cdot 10^{-13}$	370
1,50	14,7	31,6	106	$1,7 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	67
1,58	13,2	28,2	107	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$5,8 \cdot 10^{-14}$	91
1,59	14,0	28,5	111	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$5,1 \cdot 10^{-14}$	-64
1,62	13,7	27,1	110	$4,7 \cdot 10^{-14}$	$4,3 \cdot 10^{-14}$	9
1,65	13,6	26,3	112	$3,1 \cdot 10^{-14}$	$3,4 \cdot 10^{-14}$	-10
1,66	14,4	26,8	115	$8,4 \cdot 10^{-14}$	$3,2 \cdot 10^{-14}$	160
1,68	14,2	25,7	115	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$2,8 \cdot 10^{-14}$	-36
1,72	13,3	24,1	115	$5,4 \cdot 10^{-14}$	$2,1 \cdot 10^{-14}$	154
1,74	14,1	23,9	116	$7,1 \cdot 10^{-14}$	$1,9 \cdot 10^{-14}$	270

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

En la Figura 67 se representan los valores para agua granítica y salina junto con los ajustes obtenidos para agua destilada recogidos en la sección anterior. No se observa una tendencia clara de variación de los valores obtenidos con agua granítica respecto a los obtenidos con agua destilada. Sin embargo, los valores obtenidos con agua salina son en promedio un 184 % más altos que los esperados para muestra de la misma densidad ensayada con agua destilada, y además muestran mayor dispersión entre ellos. Esta mayor permeabilidad al agua salina respecto a la esperada para agua destilada es más notable para las densidades bajas.

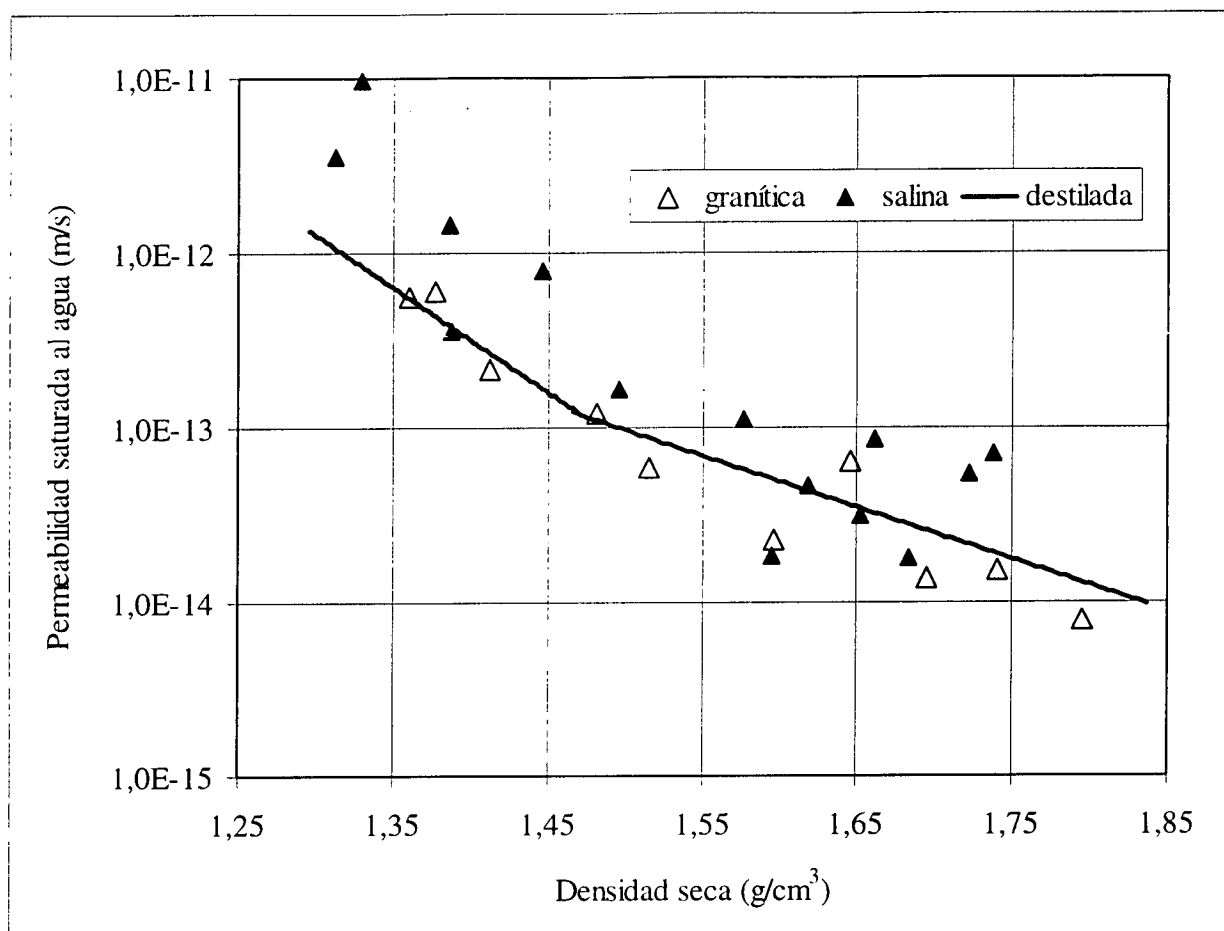


Figura 67: Conductividad hidráulica para agua granítica o salina en función de la densidad seca de la arcilla y ajuste obtenido para agua destilada

El aumento de la permeabilidad con la salinidad del permeante ha sido señalado por numerosos autores. En particular se ha comprobado que la permeabilidad de arcillas y areniscas arcillosas crece al aumentar la concentración de NaCl en el agua (Jiménez & Justo 1972). Rolfe & Aylmore (1977) atribuyen los cambios de permeabilidad observados en sus ensayos con montmorillonita e illita a los cambios en distribución iónica asociados a las variaciones en el complejo de cambio catiónico y a la concentración del electrolito utilizado como permeante. Hay varios mecanismos que contribuyen a estos cambios, entre ellos: (1) las alteraciones en la distribución de las dimensiones de los poros como resultado de la variación de la presión de hinchamiento en la matriz arcillosa, (2) las variaciones en la movilidad de las moléculas de agua asociadas a los cationes intercambiables adsorbidos en las superficies o formando dobles capas difusas (DDL), (3) las alteraciones en el comportamiento viscoso de la estructura del agua. Como consecuencia de estos

mecanismos, al aumentar la concentración del electrolito se produce una disminución de la presión de hinchamiento de las partículas arcillosas, aumentando el tamaño de los canales de flujo en detrimento del número de canales pequeños, con lo que el flujo aumenta enormemente y por tanto la permeabilidad. A la inversa, el aumento del desarrollo de dobles capas difusas al disminuir la concentración del electrolito, provoca una disminución de la permeabilidad. Por lo tanto, es la misma permeabilidad intrínseca del material la que se ve alterada por las interacciones entre el fluido y el sólido, y las variaciones mayores de permeabilidad en función de la composición del fluido se encuentran en suelos con contenidos altos en montmorillonita (McNeal & Coleman 1966). Studds et al. (1998), en sus ensayos con montmorillonita sódica, observan un claro aumento de la conductividad hidráulica al aumentar la concentración salina del permeante, que atribuyen a las modificaciones inducidas por éste en la porosidad efectiva de la arcilla. La reducción de la porosidad efectiva al disminuir la salinidad del permeante sería debida a que el espacio de poro queda ocupado por el agua ligada (DDL), cuya viscosidad es mayor que la del agua libre. Según las teorías de la doble capa difusa, el espesor de ésta disminuye al aumentar la concentración del agua en los poros, por lo que, para una porosidad dada, la porosidad efectiva de la arcilla aumentaría al hacerlo la concentración de la disolución, con el consiguiente aumento de permeabilidad.

Variación en función del sentido de la medida

La determinación de la conductividad hidráulica, según se ha descrito en las secciones previas, se realiza siempre en pastillas compactadas directamente en el anillo de la celda y con el flujo en sentido paralelo al esfuerzo de compactación. Con el fin de comprobar la influencia de la dirección de la medida en el valor del coeficiente de permeabilidad, es decir, la anisotropía de esta propiedad en la muestra compactada, se han realizado varias determinaciones utilizando probetas obtenidas mediante tallado de bloques de mayor dimensión. En concreto se han utilizado los bloques fabricados para el ensayo en maqueta del proyecto FEBEX (Figura 68). El tallado se ha realizado con un anillo cortador de las dimensiones apropiadas en dos direcciones diferentes: paralela al esfuerzo de compactación del bloque, es decir, vertical según se coloca éste en su posición de fabricación, y perpendicular al esfuerzo de compactación, o sea, en dirección horizontal.

Una vez obtenida la pastilla se introduce en el anillo de la celda de permeabilidad y se satura con agua destilada, procediéndose después a la determinación de la permeabilidad por el método convencional. Como el ajuste entre la pastilla tallada y las paredes de la celda no es perfecto, durante la saturación se produce hinchamiento, y por lo tanto cierta disminución de la densidad.

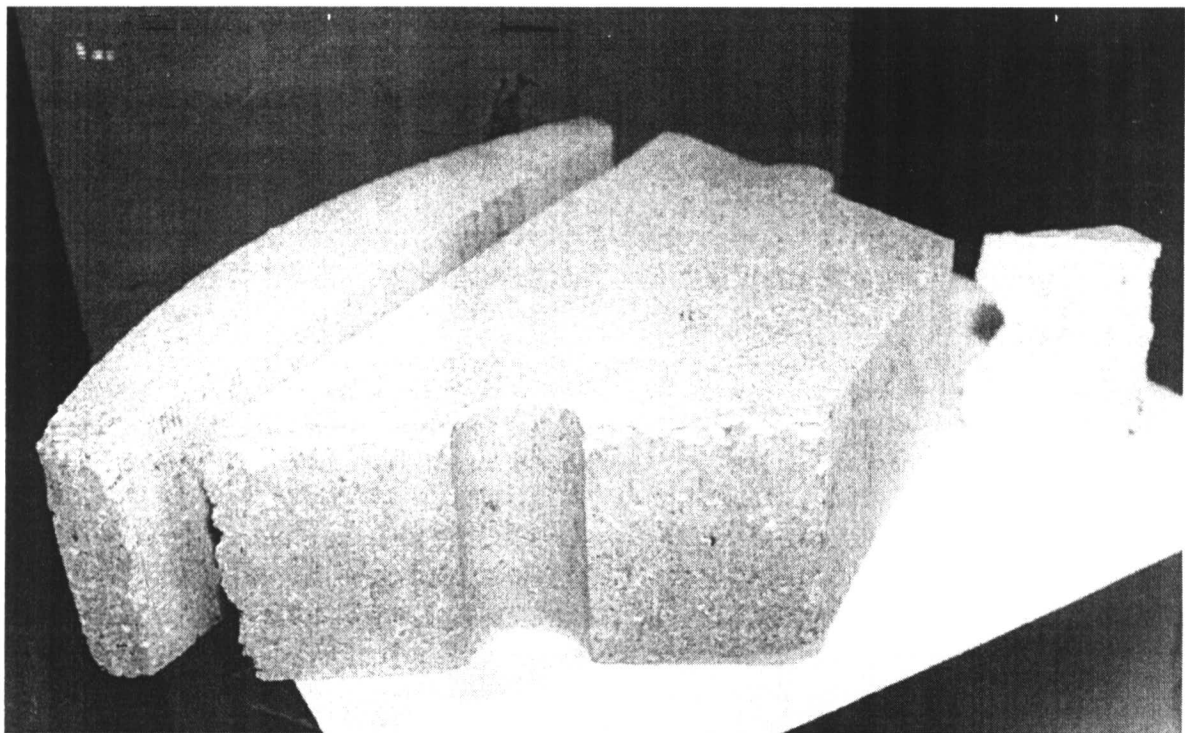


Figura 68: Aspecto de un bloque colocado en su posición de fabricación antes del tallado

En las Tabla XVII y Tabla XVIII se muestran los resultados obtenidos en función de la dirección de la determinación, junto con el valor teórico que se habría obtenido para una pastilla de la misma densidad compactada directamente en el anillo de la celda, con el flujo en sentido paralelo (columna “ k_w teórico”, deducido a partir de los ajustes mostrados en secciones previas). El porcentaje de desviación de un valor respecto a otro se refleja en la columna “Desviación”, en la que los valores negativos indican que la conductividad hidráulica obtenida es menor que la teórica y viceversa. La densidad seca indicada corresponde a la de la muestra una vez saturada, cuando, tras el hinchamiento, sus dimensiones coinciden con el volumen de la celda.

Tabla XVII: Valores de conductividad hidráulica obtenidos en muestra tallada en sentido perpendicular al esfuerzo de compactación

ρ_d (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	S _r [*] final (%)	k _w (m/s)	k _w teórico (m/s)	Desviación (%)
1,39	14,3	36,8	105	2,3·10 ⁻¹³	3,7·10 ⁻¹³	-38
1,54	15,9	33,2	119	6,0·10 ⁻¹⁴	7,4·10 ⁻¹⁴	-19
1,58		30,7	116	6,4·10 ⁻¹⁴	5,8·10 ⁻¹⁴	10
1,58	14,9	31,4	120	5,8·10 ⁻¹⁴	5,6·10 ⁻¹⁴	3
1,59	13,5	27,8	108	3,9·10 ⁻¹⁴	5,3·10 ⁻¹⁴	-26
1,64	15,3	28,1	117	5,0·10 ⁻¹⁴	3,8·10 ⁻¹⁴	30
1,66	13,9	24,7	106	2,7·10 ⁻¹⁴	3,3·10 ⁻¹⁴	-19
1,69	16,3	23,4	105	9,2·10 ⁻¹⁵	2,7·10 ⁻¹⁴	-66

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla XVIII: Valores de conductividad hidráulica obtenidos en muestra tallada en sentido paralelo al esfuerzo de compactación

ρ_d (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	S _r [*] final (%)	k _w (m/s)	k _w teórico (m/s)	Desviación %
1,33	15,2	38,9	102	5,9·10 ⁻¹³	8,4·10 ⁻¹³	-30
1,49	14,7	33,5	111	1,3·10 ⁻¹³	1,0·10 ⁻¹³	25
1,49	14,2	34,7	115	1,3·10 ⁻¹³	1,0·10 ⁻¹³	28
1,54		30,1	108	6,4·10 ⁻¹⁴	7,3·10 ⁻¹⁴	-12
1,57	16,2	28,4	107	4,3·10 ⁻¹⁴	6,0·10 ⁻¹⁴	-27
1,67	17,3	25,2	110	1,8·10 ⁻¹⁴	3,1·10 ⁻¹⁴	-41
1,67	13,7	24,1	106	1,5·10 ⁻¹⁴	3,0·10 ⁻¹⁴	-52
1,74	12,4	21,8	107	1,2·10 ⁻¹⁴	1,9·10 ⁻¹⁴	-37

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

La Figura 69 muestra los valores obtenidos en pastillas talladas según dos direcciones diferentes junto con el ajuste obtenido para pastillas compactadas en el anillo de la celda mostrado en la sección “Variación en función de la densidad seca”. Los valores obtenidos en muestra tallada son, en conjunto, algo inferiores a los teóricos para pastilla compactada, pero no se ha encontrado diferencia entre el comportamiento hidráulico de las pastillas

talladas en una u otra dirección, ya que el porcentaje de desviación es del 18 % en el caso de pastillas talladas en sentido paralelo al esfuerzo de compactación y del 16 % para pastillas talladas en sentido perpendicular. Sin embargo, en suelos inalterados arcillosos es de esperar que, en principio, la permeabilidad horizontal sea mayor que la permeabilidad vertical, debido a que están constituidos por partículas planas o aciculares sometidas a una carga anisótropa. En el caso del material estudiado en este trabajo, no se ha observado esta diferencia debido probablemente al efecto del remoldeo y compactación, que se ha realizado con la arcilla en estado seco y de forma muy rápida, por lo que las partículas no llegan a reorganizarse. Pousada (1984) recoge las contribuciones de diversos autores señalando que la compactación estática –del tipo realizado en este trabajo– produce una estructura floculada análoga a la de suelos compactados en la rama seca del ensayo Proctor. Además, la anisotropía de la permeabilidad decrece con la presencia de montmorillonita en el suelo (Jiménez & Justo 1971), debido a la forma irregular de los cristales de esmectita, que impide su orientación. Otro factor que podría influir en la falta de orientación de las partículas es la distribución granulométrica poco uniforme (Tsige 1998), ya que la bentonita tiene un 22 % de partículas tamaño limo.

Por otra parte, la disminución de la permeabilidad de pastillas talladas respecto al valor esperado en muestra compactada, puede ser debida a que la densidad seca que se ha considerado para las pastillas talladas es la que resulta de suponer un volumen de muestra igual a la capacidad interna de la celda. Pero probablemente, esta densidad no es homogénea, y aunque sea muy baja en los bordes, donde la arcilla ha expandido para rellenar la holgura inicial, la parte central de la muestra tiene una densidad superior, y ésta es la que tiene más influencia sobre el volumen de agua que atraviesa la muestra en función del tiempo, y por lo tanto, sobre el valor de permeabilidad determinado que, por esta razón, será más bajo que el esperado.

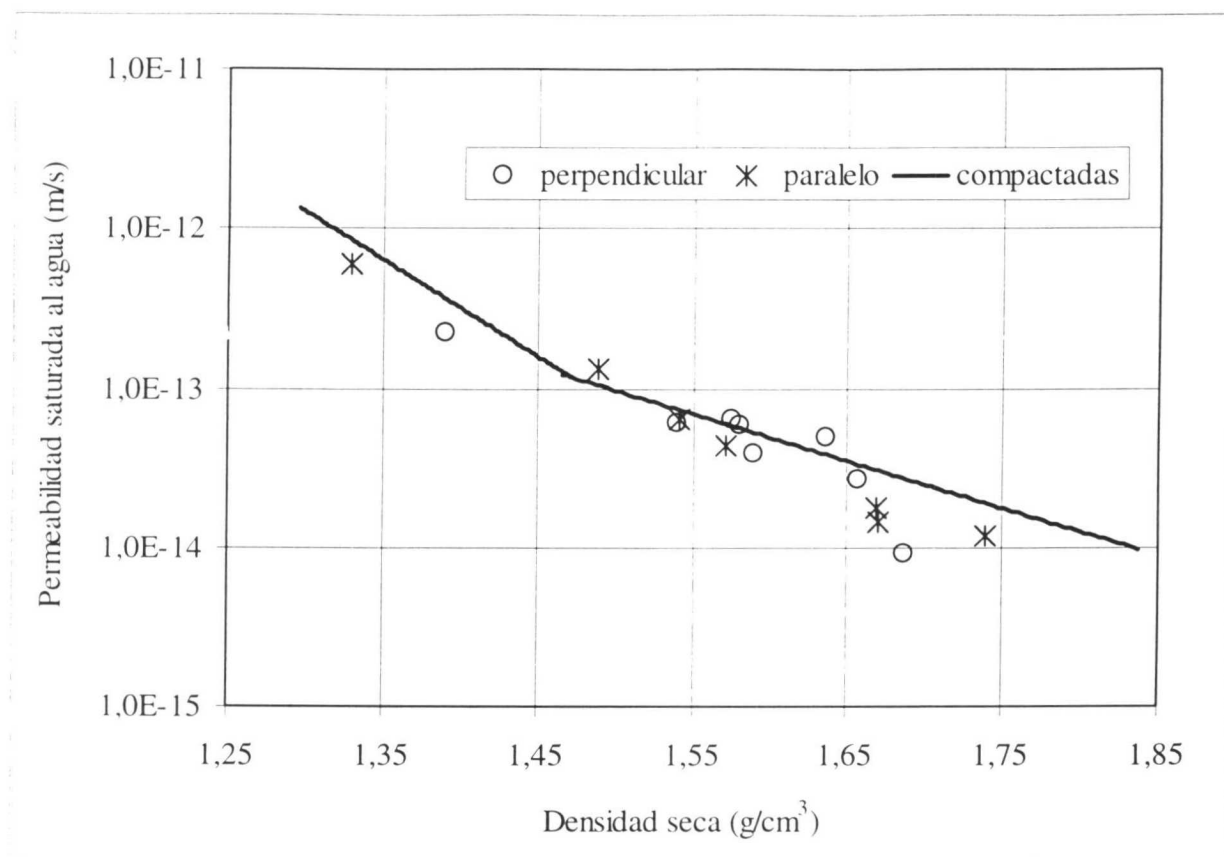


Figura 69: Conductividad hidráulica obtenida en pastillas talladas con flujo en dirección perpendicular y paralela al esfuerzo de compactación, junto con el ajuste obtenido para muestras compactadas con flujo en dirección paralela al esfuerzo de compactación

Influencia de la carga hidráulica aplicada

La aplicación de la ley de Darcy para el cálculo del coeficiente de permeabilidad requiere que la velocidad de flujo sea proporcional al gradiente hidráulico, es decir, que el valor del coeficiente obtenido sea independiente del gradiente hidráulico aplicado durante la determinación. Esto supone que la relación entre el flujo y el gradiente hidráulico es lineal y que esta relación lineal pasa por el origen. Por diferentes causas esta condición puede no cumplirse, invalidándose entonces el uso de la expresión de Darcy. Estas desviaciones se han atribuido a causas tan diversas como la existencia de artefactos experimentales, el desarrollo de una estructura de agua modificada en la proximidad de las superficies de arcilla, la reorganización de partículas durante el proceso de flujo y, en algunos sistemas reactivos, fenómenos electrocinéticos asociados a la distribución iónica dentro del medio poroso (Rolfe & Aylmore 1977).

Las medidas de Wilkinson & Shipley (1972) en diversos suelos arcillosos ponen de manifiesto la validez de la ley de Darcy, excepto para casos particulares que pueden justificarse por la utilización de fluidos que no están en equilibrio químico con la arcilla, lo que en condiciones de bajo esfuerzo efectivo puede producir migración de partículas, con el consiguiente taponamiento de los canales de flujo.

Por otra parte, Pusch (1994) considera que la conductividad hidráulica es independiente del gradiente hidráulico aplicado para medirla, aunque reconoce que, en bentonitas, los elevados gradientes que es necesario aplicar para realizar la medida pueden llegar a producir compresión del material. Por este motivo, la presión de inyección se ha mantenido en todos los ensayos realizados en este trabajo por debajo de la presión de hinchamiento esperada para la densidad seca de la muestra (*cf.* sección “Presión de hinchamiento”). En concreto, los valores de carga hidráulica aplicados en los ensayos se encuentran entre 7000 cm, para densidades secas de $1,30 \text{ g/cm}^3$, y 66000 cm para densidades secas de $1,84 \text{ g/cm}^3$. Teniendo en cuenta que la altura de la pastilla es de 2,5 cm, el gradiente hidráulico promedio ha sido de 15200 m/m. Todas las muestras se han ensayado al menos con dos gradientes hidráulicos diferentes adecuados a su densidad seca, es decir, suficientemente altos como para dar lugar a un flujo medible, pero por debajo de la presión de hinchamiento, para no producir compresión en el material (Pusch 1994). Los valores de conductividad hidráulica obtenidos para los dos gradientes hidráulicos aplicados en cada ensayo (de los recogidos en las tablas de las secciones previas) se representan en la Figura 70. Los puntos unidos por líneas corresponden a un mismo ensayo. Se observa que, aunque puede haber cierta diferencia entre el valor de la conductividad obtenido con los distintos gradientes para una misma muestra, se trata probablemente de variaciones consecuencia del método experimental, ya que no existe una tendencia de una variable respecto a la otra. Esto confirmaría la independencia del flujo observado respecto al gradiente hidráulico aplicado, y por tanto la validez de la aplicación de la ley de Darcy para el cálculo del coeficiente de permeabilidad.

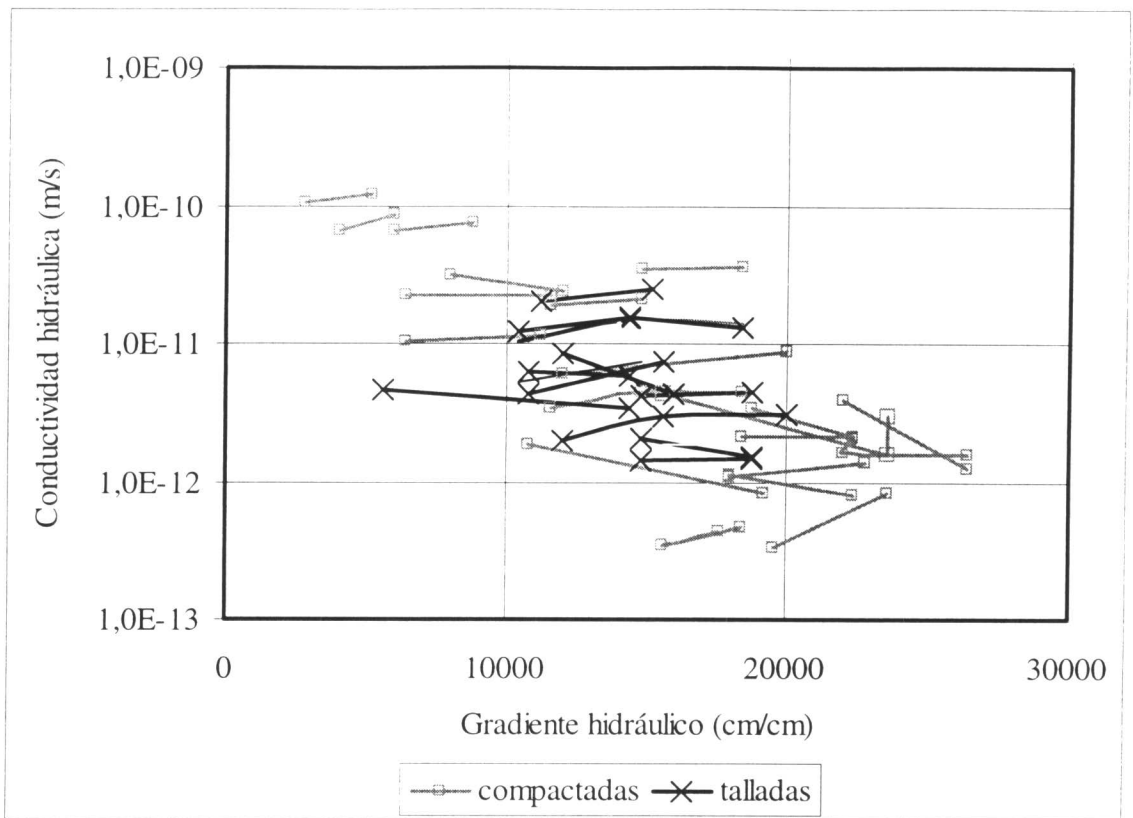


Figura 70: Variación de la conductividad hidráulica obtenida para una misma muestra (puntos unidos por líneas) en función del gradiente hidráulico y de la preparación de la muestra

Por otra parte, en la figura se observa que, al disminuir la permeabilidad de la muestra, es decir, al aumentar su densidad seca, se aumenta el valor de los gradientes hidráulicos aplicados para realizar la medida, lo que se hace necesario para poder medir el flujo. Sin embargo, no es posible discernir si para gradientes hidráulicos menores no se produce flujo o simplemente no es posible medirlo con la técnica disponible. Por lo tanto no se ha establecido si existe el gradiente hidráulico umbral, señalado por diversos autores, por debajo del cual la relación entre flujo y gradiente en arcillas se desvía de la linealidad (Olsen 1962). Para suelos de montmorillonita sódica o de litio, por debajo de este umbral parece no existir flujo, posiblemente debido al comportamiento no newtoniano del agua en los pequeños poros de estos suelos, ya que se trata de agua adsorbida, cuasi-sólida, que puede necesitar un gran esfuerzo al corte para moverse (Jiménez & Justo 1971). En cualquier caso, la importancia de esta agua adsorbida disminuye al aumentar la humedad del suelo, por lo que el umbral deberá ser más bajo para muestras de menor densidad seca, cuya saturación se alcanza con humedad más alta. Esto parece confirmarse por el hecho de

ser necesario aplicar menores gradientes hidráulicos en las muestras de densidad seca más baja, aunque como ya se ha explicado, esto podría deberse simplemente a que para estas densidades los caudales son mayores y más fáciles de medir. Yong et al. (1986) encuentran este umbral en los ensayos realizados con mezclas de arcilla expansiva y granito molido, y lo justifican por la existencia de superficies activas que producirían, en presencia de agua, interacción entre partículas, con lo que se restringiría el flujo para gradientes hidráulicos por debajo del umbral aparente. Para gradientes hidráulicos mayores observan una relación lineal entre flujo y gradiente hidráulico.

Permeabilidad al gas

Se han realizado medidas de permeabilidad al gas en muestras de la arcilla FEBEX con diferente humedad compactadas a varias densidades secas nominales. Se ha seguido el procedimiento descrito en la sección de metodología “PERMEABILIDAD AL GAS”, que consiste básicamente en hacer pasar el gas contenido en un depósito de volumen conocido a través de la probeta de arcilla y medir la pérdida de presión en el depósito en función del tiempo, calculándose la permeabilidad intrínseca de la muestra a partir de estos datos, de las dimensiones de la probeta y de las características del fluido. En estos ensayos se ha utilizado nitrógeno como gas.

Para trabajar con humedades superiores a la higroscópica, la arcilla se amasa con la cantidad de agua apropiada y se deja estabilizar durante un tiempo antes de fabricar la probeta. Para humedades más bajas de la de la arcilla en equilibrio con las condiciones de laboratorio, la arcilla se ha secado ligeramente en estufa antes de proceder a la compactación de la probeta. Este procedimiento impide que se pueda ensayar la arcilla con grados de saturación inferiores al 30 %, ya que por debajo de este valor las probetas no tienen cohesión y se desmoronan. Por este motivo se han realizado algunos ensayos con probetas fabricadas con la arcilla con su humedad higroscópica y secadas posteriormente en estufa a 110 °C, antes de proceder a la medida de permeabilidad. Al secar la muestra en la estufa se produce su retracción y el aumento de la densidad seca de la probeta respecto a la densidad nominal a la que se compactó.

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla XIX a Tabla XXII, en las que se incluye, además de la densidad seca (ρ_d), la humedad (w) y el grado de saturación (S_r) de las probetas, los valores de permeabilidad al gas (k_g) y el producto de la permeabilidad intrínseca por la permeabilidad relativa ($k_{ig} \cdot k_{rg}$), obtenidos según se describe en la sección de metodología “PERMEABILIDAD AL GAS”.

Para cada densidad existe una humedad a partir de la cual no es posible medir el paso de aire, que incluso puede no producirse, ya que el grado de saturación aumenta hasta un punto en que el aire existente en la probeta queda ocluido. Este valor de humedad es más bajo cuanto mayor es la densidad seca. Para densidad seca de $1,70 \text{ g/cm}^3$ no es posible realizar medidas con humedad superior al 14 %, lo que corresponde a un grado de saturación del 60 %. Así mismo, para cada humedad hay un valor de densidad seca a partir del cual no es posible medir el flujo de aire, si es que existe. Para la humedad higroscópica de la arcilla la máxima densidad seca a la que se pudo realizar la medida es de $1,90 \text{ g/cm}^3$, correspondiente a un grado de saturación del 80 %. Al interpretar estos valores es necesario recordar que la presión de inyección del gas es sólo de 0,1 MPa.

Tabla XIX: Valores de permeabilidad obtenidos con flujo de gas para la arcilla compactada a densidad seca nominal de $1,50 \text{ g/cm}^3$

$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$w \text{ (\%)}$	$S_r \text{ (\%)}$	$k_g \text{ (m/s)}$	$k_{ig} \cdot k_{rg} \text{ (m}^2\text{)}$
1,53	11,2	40	$6,3 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$
1,50	13,9	47	$9,5 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-13}$
1,50	15,0	51	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-13}$
1,49	15,9	53	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-13}$
1,54	23,9	86	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$5,1 \cdot 10^{-16}$

Tabla XX: Valores de permeabilidad obtenidos con flujo de gas para la arcilla compactada a densidad seca nominal de $1,60 \text{ g/cm}^3$

$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$w \text{ (\%)}$	$S_r \text{ (\%)}$	$k_g \text{ (m/s)}$	$k_{ig} \cdot k_{rg} \text{ (m}^2\text{)}$
1,57	7,3	27	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{-13}$
1,55	11,3	41	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-14}$
1,56	11,6	43	$4,3 \cdot 10^{-9}$	$7,0 \cdot 10^{-15}$

$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$w \text{ (\%)}$	$S_r \text{ (\%)}$	$k_g \text{ (m/s)}$	$k_{ig} \cdot k_{rg} \text{ (m}^2\text{)}$
1,60	11,9	47	$7,2 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-13}$
1,61	12,1	48	$5,6 \cdot 10^{-8}$	$9,2 \cdot 10^{-14}$
1,60	12,4	49	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$
1,58	13,6	52	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-13}$
1,58	14,2	54	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$
1,61	14,3	57	$7,3 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-13}$
1,59	14,7	57	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$2,6 \cdot 10^{-14}$
1,63	16,1	66	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-15}$
1,60	16,2	64	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-14}$
1,60	18,2	71	$8,8 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-15}$
1,61	18,4	73	$5,5 \cdot 10^{-9}$	$8,9 \cdot 10^{-15}$
1,63	22,4	92	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$4,7 \cdot 10^{-18}$

Tabla XXI: Valores de permeabilidad obtenidos con flujo de gas para la arcilla compactada a densidad seca nominal de 1,70 g/cm³

$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$w \text{ (\%)}$	$S_r \text{ (\%)}$	$k_g \text{ (m/s)}$	$k_{ig} \cdot k_{rg} \text{ (m}^2\text{)}$
1,75*	5,0	25	$5,9 \cdot 10^{-9}$	$9,5 \cdot 10^{-15}$
1,68	6,1	27	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$8,5 \cdot 10^{-14}$
1,66	6,4	28	$8,3 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-13}$
1,67	7,2	32	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$6,3 \cdot 10^{-14}$
1,70	8,4	39	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-14}$
1,70	10,2	47	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-14}$
1,70	10,7	49	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$2,8 \cdot 10^{-15}$
1,68	11,0	49	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$
1,67	12,0	53	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-14}$
1,69	12,0	54	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-14}$
1,68	12,4	55	$7,1 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-14}$
1,70	12,4	57	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$3,1 \cdot 10^{-14}$
1,69	12,8	58	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$2,6 \cdot 10^{-14}$
1,70	13,8	63	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-15}$

$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$w \text{ (\%)}$	$S_r \text{ (\%)}$	$k_g \text{ (m/s)}$	$k_{ig} \cdot k_{rg} \text{ (m}^2\text{)}$
1,70	14,0	61	$5,3 \cdot 10^{-9}$	$8,7 \cdot 10^{-15}$
1,70	14,0	64	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-14}$
1,64	14,4	60	$4,4 \cdot 10^{-10}$	$7,2 \cdot 10^{-16}$

* compactada a densidad seca 1,70 g/cm³ y secada en estufa

Tabla XXII: Valores de permeabilidad obtenidos con flujo de gas para la arcilla compactada a densidad seca nominal de 1,80 y 1,90 g/cm³

$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$w \text{ (\%)}$	$S_r \text{ (\%)}$	$k_g \text{ (m/s)}$	$k_{ig} \cdot k_{rg} \text{ (m}^2\text{)}$
1,81 *	1,3	7	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-14}$
1,80	12,7	69	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$2,8 \cdot 10^{-15}$
1,80	12,4	67	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-15}$
1,86 *	0,9	5	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-14}$
1,90	12,4	80	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-16}$

* compactada a densidad seca 1,70 g/cm³ y secada en estufa

La Figura 71 muestra la evolución de la presión en algunos de los ensayos realizados con arcilla compactada a densidad seca nominal de 1,70 g/cm³ con diferentes humedades, observándose la mayor lentitud de paso de aire en muestras con mayor grado de saturación (mayor humedad), lo que se traduce en un valor menor de permeabilidad.

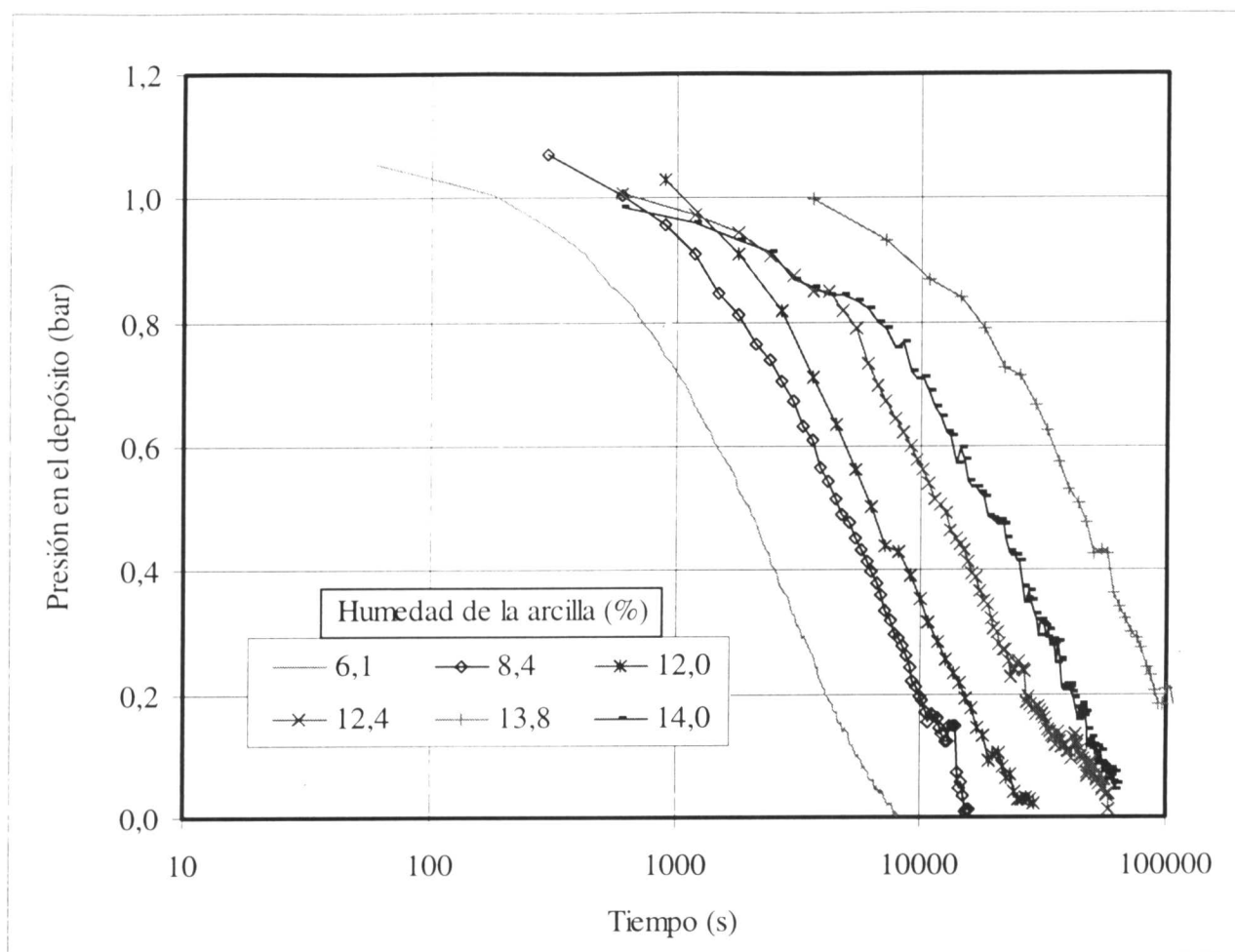


Figura 71: Evolución de la presión de gas en los ensayos realizados con arcilla compactada a densidad seca $1,70 \text{ g/cm}^3$ con diferente humedad

Así mismo, las curvas de evolución de presión en algunos ensayos realizados con la arcilla con su humedad higroscópica compactada a diferentes densidades se muestran en la Figura 72, en la que se observa cómo aumenta el tiempo necesario para que se registre disminución de presión en el depósito a medida que aumenta la densidad seca, y cómo la disminución posterior de presión es también más lenta.

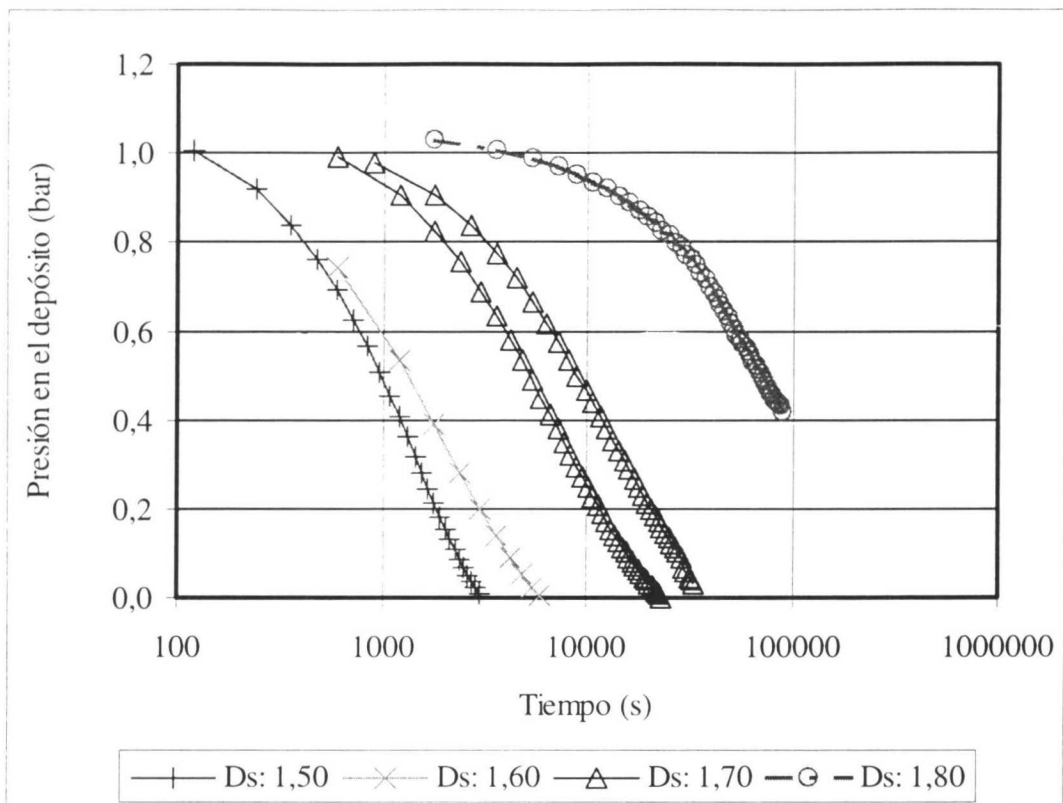


Figura 72: Evolución de la presión de gas en los ensayos realizados con arcilla con humedad higroscópica compactada a diferentes densidades secas (D_s , g/cm^3)

Al representar los valores de permeabilidad al gas obtenidos para una misma humedad de la arcilla en función de la densidad seca, se observa una disminución exponencial de la permeabilidad al aumentar la densidad, según se muestra en la Figura 73. La relación entre permeabilidad obtenida con flujo de gas (k_g , m^2) y densidad seca (ρ_d , g/cm^3) para una misma humedad (w , %) se puede ajustar a las siguientes expresiones, que no deben ser extrapoladas más allá de los grados de saturación ensayados.

Para $w = 6,7 \%$	$\log k_g = 8,00 - 9,19 \rho_d$	$(r^2=0,94)$
-------------------	---------------------------------	--------------

Para $w = 13,6 \%$	$\log k_g = 5,47 - 8,02 \rho_d$	$(r^2=0,90)$
--------------------	---------------------------------	--------------

Para $w = 15,6 \%$	$\log k_g = 11,29 - 12,12 \rho_d$	$(r^2=0,88)$
--------------------	-----------------------------------	--------------

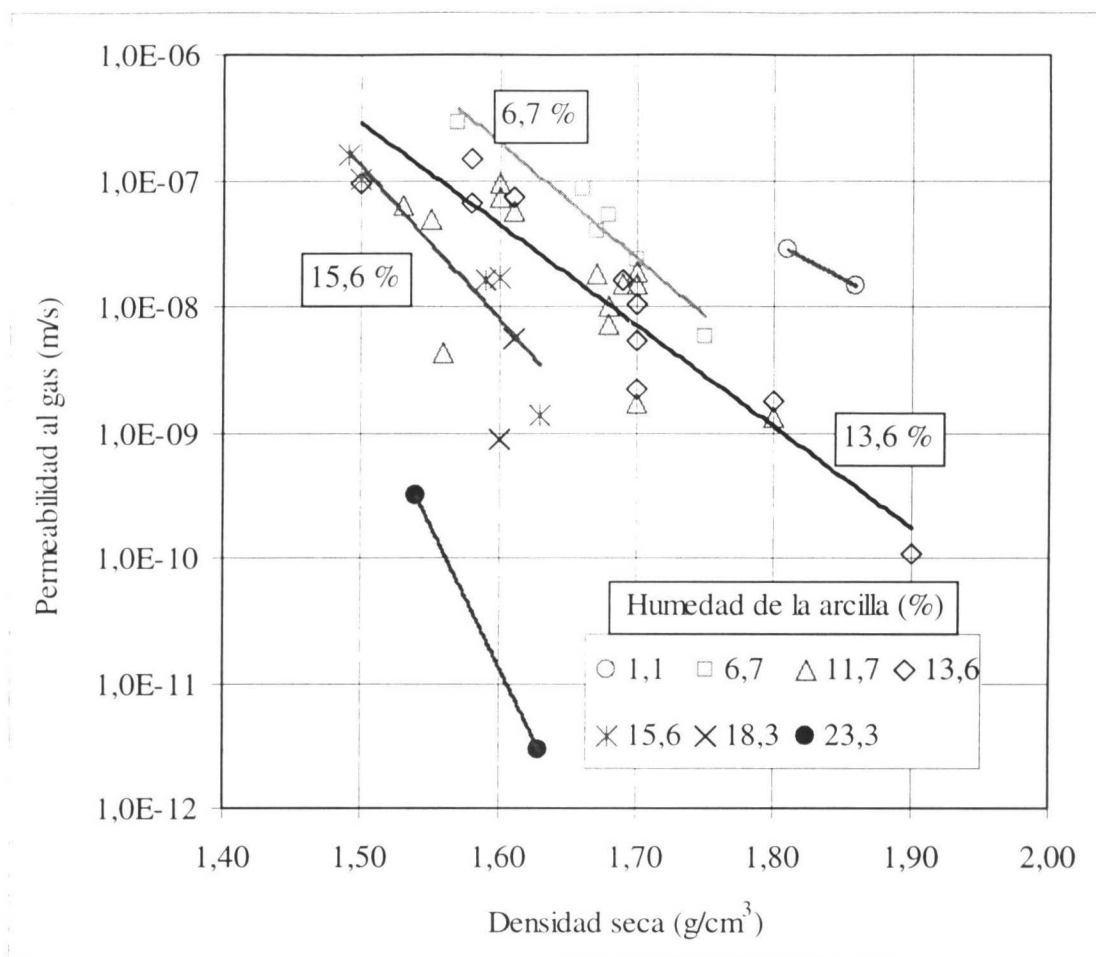


Figura 73: Permeabilidad al gas en función de la densidad de la arcilla para muestras compactadas con diferente humedad

En la Figura 74 se muestra la variación de la permeabilidad al gas en función del volumen de poros accesible, es decir, disponible para el paso del gas, representado como el producto del índice de poros por la unidad menos el grado de saturación. Este factor es, de hecho, el que presenta una mejor correlación con los valores de permeabilidad obtenidos, mayor que la densidad seca o la humedad considerados por separado. De esta figura puede desprenderse la siguiente relación potencial entre la permeabilidad al gas (k_g , m/s), el grado de saturación (S_r) y el índice de poros (e):

$$k_g = 2,29 \cdot 10^{-6} (e (1 - S_r))^{4,17} \quad (r^2 = 0,77, 41 \text{ puntos})$$

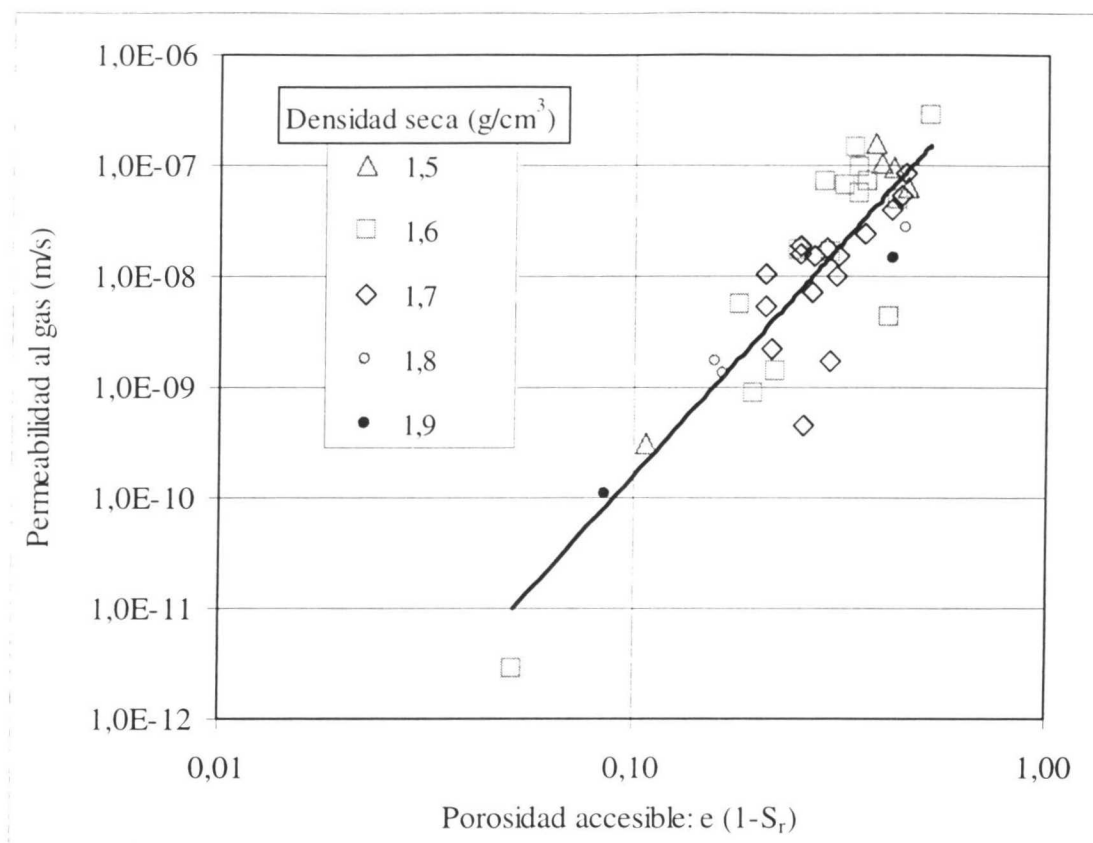


Figura 74: Relación entre la permeabilidad al gas y el volumen de poros accesible al gas

En la Figura 75 se representan todos los valores del producto de la permeabilidad intrínseca por la permeabilidad relativa, obtenidos mediante flujo de gas, en función del grado de saturación para cada densidad seca. Se han incluido también los valores de permeabilidad intrínseca obtenidos a partir de las medidas de conductividad hidráulica (ajustes de la sección “Conductividad hidráulica”), que corresponden por tanto a la muestra saturada (permeabilidad relativa al agua igual a 1). Se observa que la permeabilidad intrínseca para un mismo grado de saturación es función de la densidad seca de la muestra. Así mismo, queda patente que la disminución de la permeabilidad al gas para grados de saturación superiores a determinado valor umbral (entre 65 y 80 %, dependiendo de la densidad seca) es muy acusada, lo que marca la discontinuidad de la fase gaseosa.

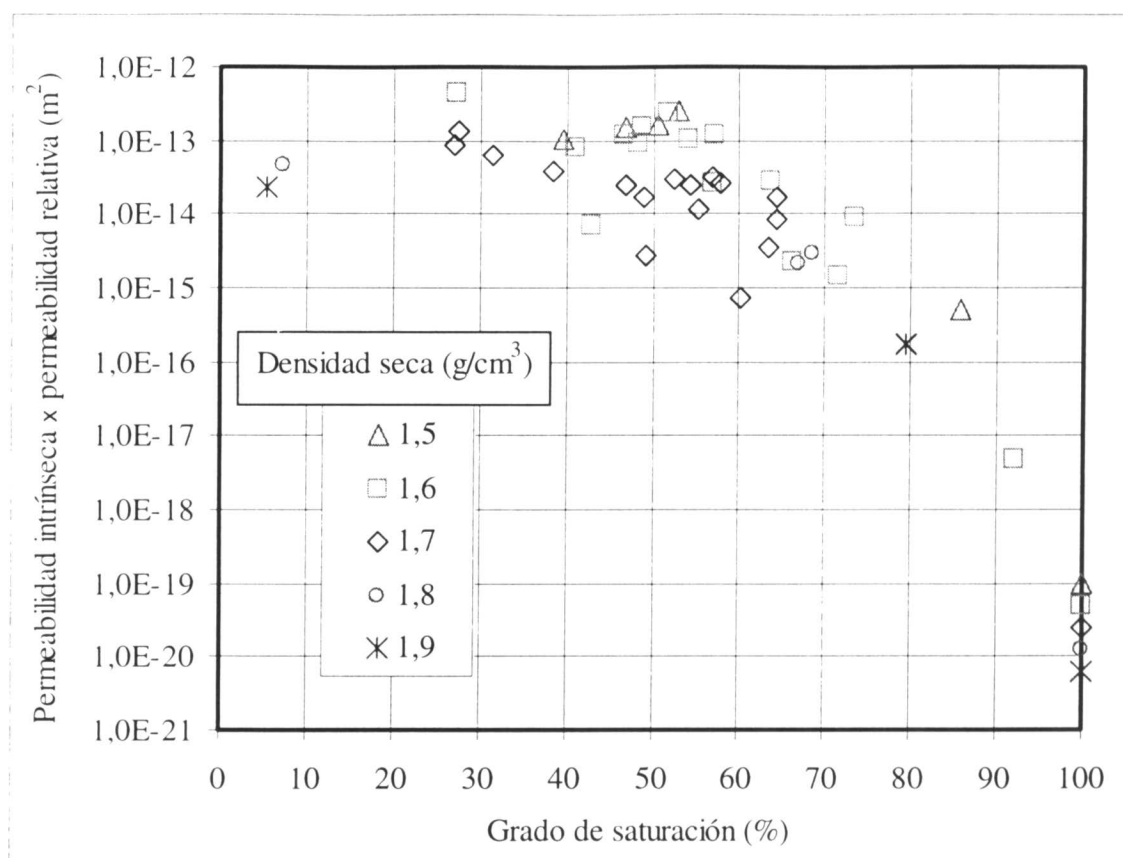


Figura 75: Producto de la permeabilidad relativa por la permeabilidad intrínseca medida con flujo de gas en muestras compactadas con diferente densidad y humedad (los valores correspondientes a $S_r=100\%$ provienen de las medidas de conductividad hidráulica)

Si en la ecuación precedente se hace el grado de saturación igual a 0, se obtiene la permeabilidad al gas en la bentonita seca compactada a diferentes densidades (k_{g0} , m/s). Una vez obtenido este valor, se puede estimar la permeabilidad intrínseca de la bentonita, medida con flujo de gas, a partir de la siguiente relación (cf. sección de Metodología “PERMEABILIDAD AL GAS”):

$$k_{ig} = \frac{k_{g0} \times \mu_g}{\rho_g \times g \times k_{rg}} = \frac{k_{g0}}{1,6 \cdot 10^{-6} \times k_{rg}}$$

donde ρ_g y μ_g son la densidad y la viscosidad dinámica del nitrógeno, respectivamente, k_{ig} es la permeabilidad intrínseca medida con gas nitrógeno (m^2), y k_{rg} es la permeabilidad relativa al gas (que por ser el grado de saturación 0 es igual a 1). Los valores obtenidos mediante este cálculo se representan en la Figura 76. En esta figura se muestra también la

variación de la permeabilidad intrínseca con el índice de poros obtenida a partir de los ensayos de flujo de agua recogidos en la sección “Conductividad hidráulica”. Para el mismo índice de poros, se pueden observar diferencias de hasta ocho órdenes de magnitud entre los valores de permeabilidad intrínseca de la arcilla seca o saturada.

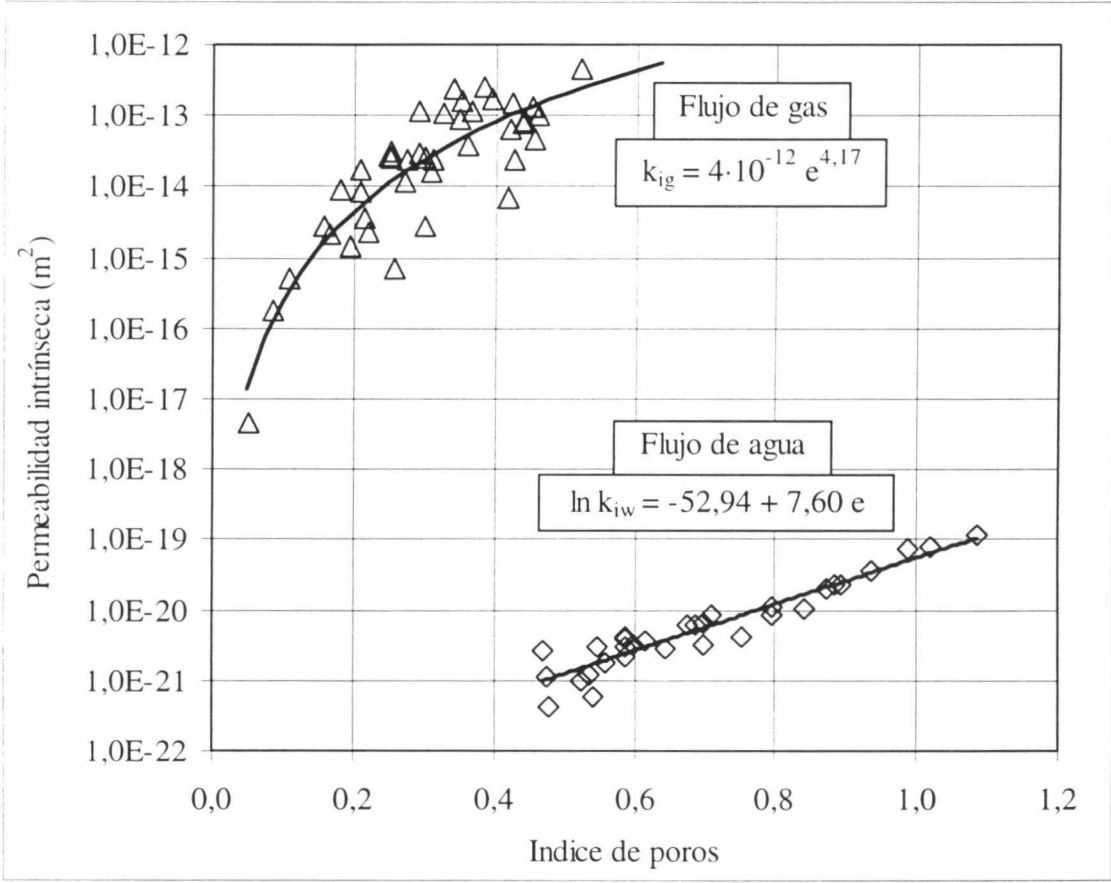


Figura 76: Permeabilidad intrínseca de la bentonita compactada obtenida a partir de ensayos de flujo de agua en muestra saturada y de flujo de gas en muestra seca

Estas observaciones sugieren que existe una diferencia fundamental de disposición microestructural entre muestra saturada y no saturada, producida por el hinchamiento de la arcilla al hidratarse, que no se encontraría en materiales no expansivos. La permeabilidad intrínseca es una propiedad que depende sólo del medio. Por tanto, si el fluido no interacciona con el suelo variando las propiedades de uno u otro, el mismo valor de permeabilidad intrínseca se obtendría con cualquier fluido. Sin embargo, si las interacciones del fluido y el suelo alteran la estructura del medio, la permeabilidad intrínseca puede verse también modificada. Este es el caso de las arcillas expansivas

cuando se utiliza agua como fluido, lo que provoca una expansión de las láminas de arcilla que da lugar a la disminución del espacio disponible para el flujo (Tindall & Kunkel 1999).

La hidratación de las partículas de arcilla a volumen constante provoca una reducción del tamaño de los poros entre agregados de arcilla. En condiciones secas, el diámetro de los macroporos accesibles al flujo de gas puede ser incluso superior a 10 μm . La arcilla hidratada en condiciones confinadas presenta el mismo volumen global de poros que una muestra seca de la misma densidad seca, pero los espacios entre agregados se reducen o eliminan, debido al hinchamiento de las partículas de arcilla. Es decir, durante la hidratación de la arcilla a volumen constante, el volumen ocupado por los mesoporos pequeños y los microporos aumenta, mientras que el volumen ocupado por macroporos disminuye. En condiciones saturadas, el diámetro medio de poros accesibles está en el tamaño de los meso y microporos, es decir, es más de tres órdenes de magnitud inferior al diámetro de los grandes poros inter-agregado. Esta variación en el diámetro medio de los poros disponibles para el flujo explica la gran diferencia en los valores de permeabilidad intrínseca medidos en muestra seca y saturada.

Una constatación de este aspecto se ha encontrado en el estudio al microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM) de la arcilla FEBEX. Este equipo permite observar la microestructura de la arcilla bajo diferentes condiciones de humedad relativa ambiental, y por tanto de saturación. La Figura 77 muestra el aspecto de los agregados de arcilla compactada a densidad seca de 1,70 g/cm^3 con su humedad higroscópica. La fotografía está tomada en la cámara del ESEM mantenida a una humedad relativa del 50 %, que es aproximadamente aquella con la que la arcilla estaba en equilibrio cuando se compactó. Esta muestra se hidrata de forma progresiva por imposición de una humedad relativa cada vez mayor en la misma cámara del microscopio. La Figura 78 es una fotografía tomada bajo humedad relativa del 100 %, tras haber saturado la misma muestra por aumento progresivo de la humedad relativa durante 5 horas. El volumen de muestra ensayado es muy pequeño, por lo que su hidratación se produce muy rápidamente. A pesar de la ausencia de confinamiento, se puede observar la disminución del tamaño de algunos poros inter-agregado.

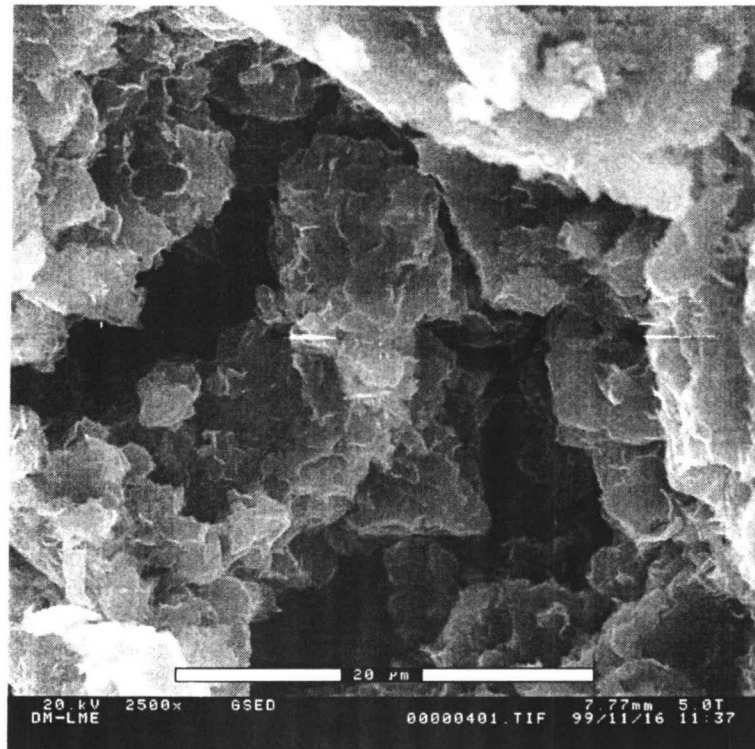


Figura 77: Fotografía de la arcilla FEBEX compactada a densidad seca $1,70 \text{ g/cm}^3$ con su humedad higroscópica, tomada en el ESEM a humedad relativa del 50 %

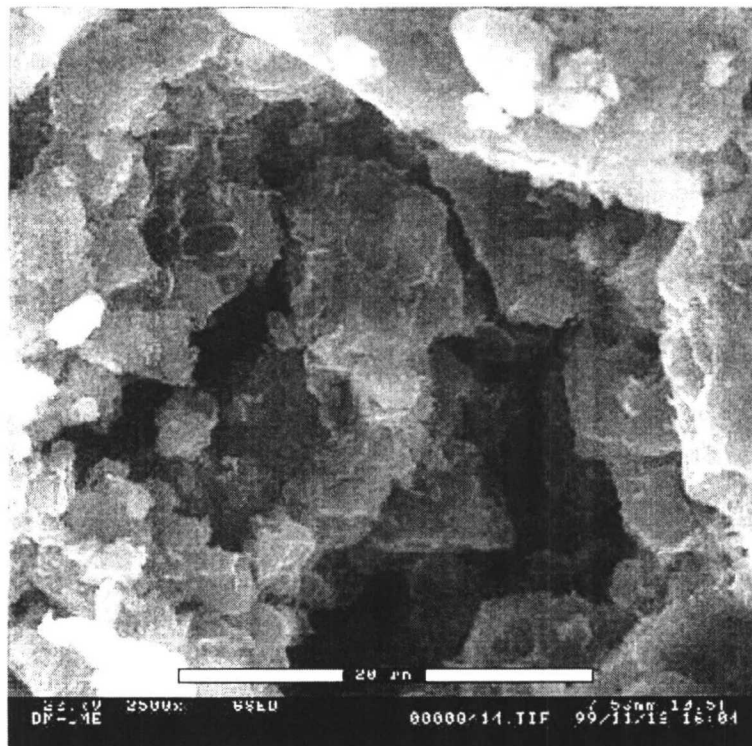


Figura 78: Fotografía de la misma zona de la Figura 77, tomada en el ESEM a humedad relativa del 100 %

Hay que señalar que los valores de permeabilidad intrínseca para diferentes grados de saturación obtenidos mediante este método no tienen por qué representar exactamente la evolución de permeabilidad intrínseca que sufriría una probeta que se satura a volumen constante. Los valores presentados en esta sección corresponden a muestras que se han obtenido por compactación de la arcilla con una humedad determinada, y su microestructura no es necesariamente la misma que la de una muestra que se va saturando progresivamente en condiciones confinadas.

Curva de retención

La curva de retención describe la evolución de humedad experimentada por una muestra al ser sometida a succiones progresivamente crecientes o decrecientes, es decir, a trayectorias de secado o de humectación.

Se ha trabajado con muestras obtenidas a partir de la compactación del granulado de arcilla con su humedad higroscópica a diferentes densidades. En las determinaciones estándar de la curva de retención la muestra no está confinada, lo que da lugar a que, en el caso de suelos expansivos, el volumen de ésta se modifique durante la determinación, debido a la pérdida o toma de agua. Esto ocasiona que las variaciones del grado de saturación no sean del mismo orden que las de la humedad, como se ha podido comprobar en las determinaciones a volumen libre que se incluyen en la siguiente sección. Teniendo esto en cuenta, y puesto que la situación de la bentonita en la barrera va a ser confinada, se han puesto a punto técnicas experimentales que permiten la determinación de la relación succión/humedad a volumen constante, cuyos resultados se recogen también más adelante.

Curva de retención a volumen libre

La curva de retención de la muestra no confinada se ha determinado aplicando dos técnicas diferentes para imponer la succión. Para las succiones superiores a 3 MPa se ha utilizado el control de la humedad relativa de la atmósfera que rodea la muestra, introduciéndolas en desecadores con disolución de ácido sulfúrico de porcentajes en peso entre 6 y 67 %. En cada desecador se introducen entre 3 y 9 pastillas. Para succiones de entre 2,0 y 0,1 MPa se ha utilizado la técnica de traslación de ejes, imponiendo la presión de nitrógeno deseada

en el interior de celdas de membrana, en cada una de las cuales se puede introducir una sola pastilla. En ambos casos el diámetro nominal de las pastillas es de 3,00 cm y su altura de 1,20 cm. Cada pastilla permanece en el desecador o celda correspondiente por un tiempo comprendido entre 20 y 30 días, después del cual se pesa y se mide –para determinar su humedad y densidad– y se pasa al siguiente escalón de succión (desecador o celda según corresponda). Este tiempo se ha establecido después de comprobar que es el necesario para que la arcilla alcance la humedad de estabilización para un determinado valor de succión.

Puesto que el ensayo se realiza a volumen libre, la muestra hincha o se retrae según que tome agua o la pierda. Mediante la medida de las dimensiones de la muestra después de cada escalón de succión es posible determinar su densidad, que aunque no se puede controlar sí se conoce en cada momento. Esta variación libre de densidad impide que se establezca una clara relación entre succión y grado de saturación, pero no entre succión y humedad.

Se ha determinado la curva de retención en muestras preparadas de dos maneras: pastillas compactadas a partir de la muestra granulada y pastillas talladas a partir de bloques de los fabricados para el ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX. En las dos subsecciones siguientes se presentan los resultados obtenidos en ambos casos y, posteriormente, se realiza un análisis conjunto de las diferentes curvas de retención obtenidas a volumen libre.

Todas las determinaciones se han realizado a 20 °C.

Pastillas compactadas

Inicialmente se determinó la relación succión/humedad para tres succiones diferentes, correspondientes al valor de equilibrio en las condiciones del laboratorio (140 MPa), un valor superior (260 MPa) y otro inferior (14 MPa). Las determinaciones se realizaron sobre pastillas compactadas uniaxialmente a densidad seca nominal de $1,60 \text{ g/cm}^3$ con su humedad higroscópica ($14 \pm 1 \%$). Se utilizaron 7 muestras para las determinaciones a la

succión más alta, 13 muestras para la succión intermedia y 10 muestras para la inferior. Los valores medios obtenidos para cada succión se muestran en la Tabla XXIII.

Tabla XXIII: Valores medios finales de humedad y densidad correspondientes a cada succión para pastillas compactadas con densidad seca inicial $1,60 \text{ g/cm}^3$ y humedad 14 %

Nº muestras	Succión (MPa)	$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Humedad (%)	$S_r \text{ (%)}$
7	$257,7 \pm 2,7$	$1,64 \pm 0,02$	$8,7 \pm 0,4$	36 ± 2
13	$138,2 \pm 7,0$	$1,61 \pm 0,02$	$12,1 \pm 0,8$	48 ± 3
10	$14,5 \pm 0,4$	$1,36 \pm 0,03$	$22,3 \pm 0,3$	62 ± 3

Posteriormente, se han utilizado otras muestras para determinar dos curvas de retención siguiendo trayectorias diferentes: una de humectación (desde 148 a 0 MPa), y otra de secado/humectación (desde 140 a 313 MPa, y a 0,1 MPa). En ambos casos se ha partido de la succión correspondiente a la muestra con su humedad higroscópica y se han utilizado tres pastillas para cada determinación, compactadas uniaxialmente a densidad seca nominal inicial de $1,75 \text{ g/cm}^3$ y con humedad de 14,2 %, ambas similares a las de los bloques fabricados para el ensayo en maqueta. Además, se ha realizado otra trayectoria de secado/humectación utilizando pastillas compactadas a densidad seca de $1,70 \text{ g/cm}^3$ con humedad del 13,6 %. En este último caso el secado ha sido más intenso, llegándose a succiones de 517 MPa.

Los valores medios de las tres determinaciones para la trayectoria de humectación se muestran en la Tabla XXIV, en la que se observa el aumento notable de la humedad al disminuir la succión acompañado de una disminución de la densidad seca de la muestra, por lo que el grado de saturación no se modifica demasiado. La desviación estándar de las tres medidas realizadas para la humedad está entre 0,0 y 3,4 % y para la densidad seca entre 0,00 y $0,03 \text{ g/cm}^3$, aumentando ambas al disminuir la succión. La representación gráfica de estos valores se puede encontrar en la Figura 80 y Figura 81.

Tabla XXIV: Valores de humedad y densidad obtenidos al final de cada escalón en una trayectoria de humectación para pastillas compactadas a densidad seca inicial $1,75 \text{ g/cm}^3$ (media de 3 determinaciones)

Succión (MPa)	$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Humedad (%)	$S_r \text{ (%)}$
148,2	1,76	13,6	69
79,2	1,66	16,0	69
34,3	1,52	21,3	74
13,3	1,42	24,6	74
6,6	1,35	27,7	74
3,8	1,29	29,9	74
2,0	1,17	35,7	74
1,0	1,13	39,7	77
0,5	1,09	43,5	80
0,1	0,98	50,4	77

Para las succiones comprendidas entre 148 y 0,1 MPa, es posible ajustar las siguientes ecuaciones para densidad seca inicial de $1,75 \text{ g/cm}^3$, que relacionan la succión con la humedad y la densidad seca:

$$w = -5,04 \ln s + 38,35 \quad (r^2 = 0,98, 30 \text{ puntos})$$

$$\rho_d = 1,14 s^{0,08} \quad (r^2 = 0,99, 30 \text{ puntos})$$

donde w es la humedad en %, s la succión en MPa y ρ_d la densidad seca en g/cm^3 .

Los valores medios para cada succión en las curvas de secado/humectación obtenidas para dos densidades secas iniciales diferentes se muestran en la Tabla XXV. La representación gráfica de estos valores se puede encontrar más adelante en la Figura 82 a Figura 85. Durante la trayectoria de secado la disminución de humedad va acompañada de un aumento de la densidad seca, que posteriormente disminuye durante la humectación, a la vez que aumenta la humedad. La desviación estándar de las tres medidas realizadas para la humedad está entre 0,0 y 1,7 % (aunque para la mayor parte de las succiones está entre 0,3 y 0,4 %). La desviación estándar para la densidad seca está entre 0,01 y $0,06 \text{ g/cm}^3$,

aumentando la disparidad para las succiones más bajas, debido a las dificultades experimentales asociadas al desmoronamiento de las pastillas.

Tabla XXV: Valores de humedad y densidad obtenidos al final de cada escalón en una trayectoria de secado/humectación para pastillas compactadas (media de 3 determinaciones)

Densidad seca inicial 1,75 g/cm ³				Densidad seca inicial 1,70 g/cm ³			
Succión (MPa)	ρ _d (g/cm ³)	Humedad (%)	S _r (%)	Succión (MPa)	ρ _d (g/cm ³)	Humedad (%)	S _r (%)
140,0	1,76	13,8	70	139,2	1,66	13,3	57
217,0	1,77	12,3	63	196,1	1,67	11,2	49
313,0	1,81	8,9	49	259,8	1,69	9,3	42
223,0	1,77	11,5	59	356,3	1,71	6,4	30
135,0	1,73	13,5	65	516,9	1,72	4,4	21
29,0	1,49	21,1	70	264,2	1,69	7,8	35
13,3	1,42	24,1	72	187,3		10,9	
6,7	1,34	26,6	71	126,4		12,6	
3,9	1,24	28,5	65	74,9	1,56	15,7	59
2,0	1,19	36,1	77	32,9	1,45	20,0	63
1,0	1,12	40,0	77	12,4	1,36	23,5	65
0,5	1,06	43,8	77				
0,1	1,04	56,8	95				

Para los ensayos realizados con pastillas de densidad seca inicial de 1,75 g/cm³ se han obtenido los siguientes ajustes para la trayectoria de secado, desde 140 hasta 313 MPa:

$$w = -6,07 \ln s + 44,15 \qquad (r^2 = 0,93, \text{ 9 puntos})$$

$$\rho_d = 1,48 \, s^{0,03} \qquad (r^2 = 0,66, \text{ 9 puntos})$$

y para la de humectación tras secado, desde 313 hasta 0,1 MPa:

$$w = -5,54 \ln s + 39,77 \qquad (r^2 = 0,98, \text{ 33 puntos})$$

$$\rho_d = 1,15 \, s^{0,08} \qquad (r^2 = 0,98, \text{ 32 puntos})$$

A su vez, para los ensayos realizados con pastillas de densidad seca inicial de 1,70 g/cm³ se han obtenido los siguientes ajustes para la trayectoria de secado, desde 139 hasta 517 MPa:

$$w = -7,06 \ln s + 48,29 \quad (r^2 = 0,98, 15 \text{ puntos})$$

$$\rho_d = 1,42 s^{0,03} \quad (r^2 = 0,73, 15 \text{ puntos})$$

y para la de humectación tras secado, desde 517 hasta 12 MPa:

$$w = -5,21 \ln s + 37,55 \quad (r^2 = 0,98, 21 \text{ puntos})$$

$$\rho_d = 1,16 s^{0,06} \quad (r^2 = 0,98, 15 \text{ puntos})$$

en todos los casos, w es la humedad en %, s la succión en MPa y ρ_d la densidad seca en g/cm³.

Pastillas talladas a partir de bloques

Con el fin de comprobar si la relación succión/humedad se modifica al variar el método inicial de preparación de las pastillas, se han realizado varias determinaciones según el procedimiento descrito, utilizando probetas obtenidas mediante tallado de algunos bloques de los fabricados para el ensayo en maqueta (cf. sección “El Proyecto FEBEX”). El tallado se ha realizado con un anillo cortador en dos direcciones diferentes: paralela al esfuerzo de compactación del bloque, es decir, vertical según se coloca el bloque en su posición de fabricación, y perpendicular al esfuerzo de compactación, o sea, en dirección horizontal (Figura 68). Las dimensiones del anillo cortador permiten obtener pastillas del mismo tamaño que las compactadas, es decir, diámetro 3,00 cm y altura 1,20 cm.

Se han determinado dos curvas, comenzando siempre desde la succión correspondiente a la arcilla con su humedad de equilibrio en las condiciones del laboratorio, pero siguiendo trayectorias diferentes: una de humectación, mediante reducción de la succión hasta 0,1 MPa, y otra de secado hasta 394 MPa, seguido de humectación hasta 0,1 MPa. Para la determinación de cada una de las curvas se han utilizado 3 pastillas talladas en sentido horizontal y 3 talladas en sentido vertical. Aunque se ha partido de bloques con una

densidad seca superior a $1,75 \text{ g/cm}^3$, al realizarse el tallado esta densidad disminuye, y no de la misma forma en todas las muestras, por lo que la densidad seca inicial media de las pastillas talladas es de $1,67 \text{ g/cm}^3$, con variaciones entre $1,59$ y $1,73 \text{ g/cm}^3$. La humedad inicial es del $14,2 \%$.

Los valores medios obtenidos para la curva de humectación se muestran en la Tabla XXVI, y su representación gráfica en la Figura 79. En esta figura se incluye también la evolución de la densidad seca al disminuir la succión. Hay que señalar que la determinación de densidad seca para las succiones más bajas es dificultosa, porque la pastilla pierde su consistencia y se desmorona fácilmente.

Tabla XXVI: Valores de humedad y densidad obtenidos al final de cada escalón en una trayectoria de humectación para pastillas talladas en sentido perpendicular y paralelo al esfuerzo de compactación del bloque (media de 3 determinaciones)

	TALLADO PERPENDICULAR			TALLADO PARALELO		
Succión (MPa)	$\rho_d (\text{g/cm}^3)$	Humedad (%)	$S_r (\%)$	$\rho_d (\text{g/cm}^3)$	Humedad (%)	$S_r (\%)$
116,7	1,67	14,1	61	1,67	14,2	62
79,2	1,61	16,0	64	1,62	16,1	65
31,2	1,48	20,7	67	1,47	20,7	67
13,5	1,40	23,4	69	1,39	23,6	68
3,9	1,30	28,5	71	1,25	29,2	68
2,0	1,14	34,1	68	1,21	33,8	74
1,0	1,08	36,5	66	1,06	37,0	65
0,5	1,05	40,3	69	1,06	40,4	71
0,1	0,97	53,9	82	0,97	51,2	78

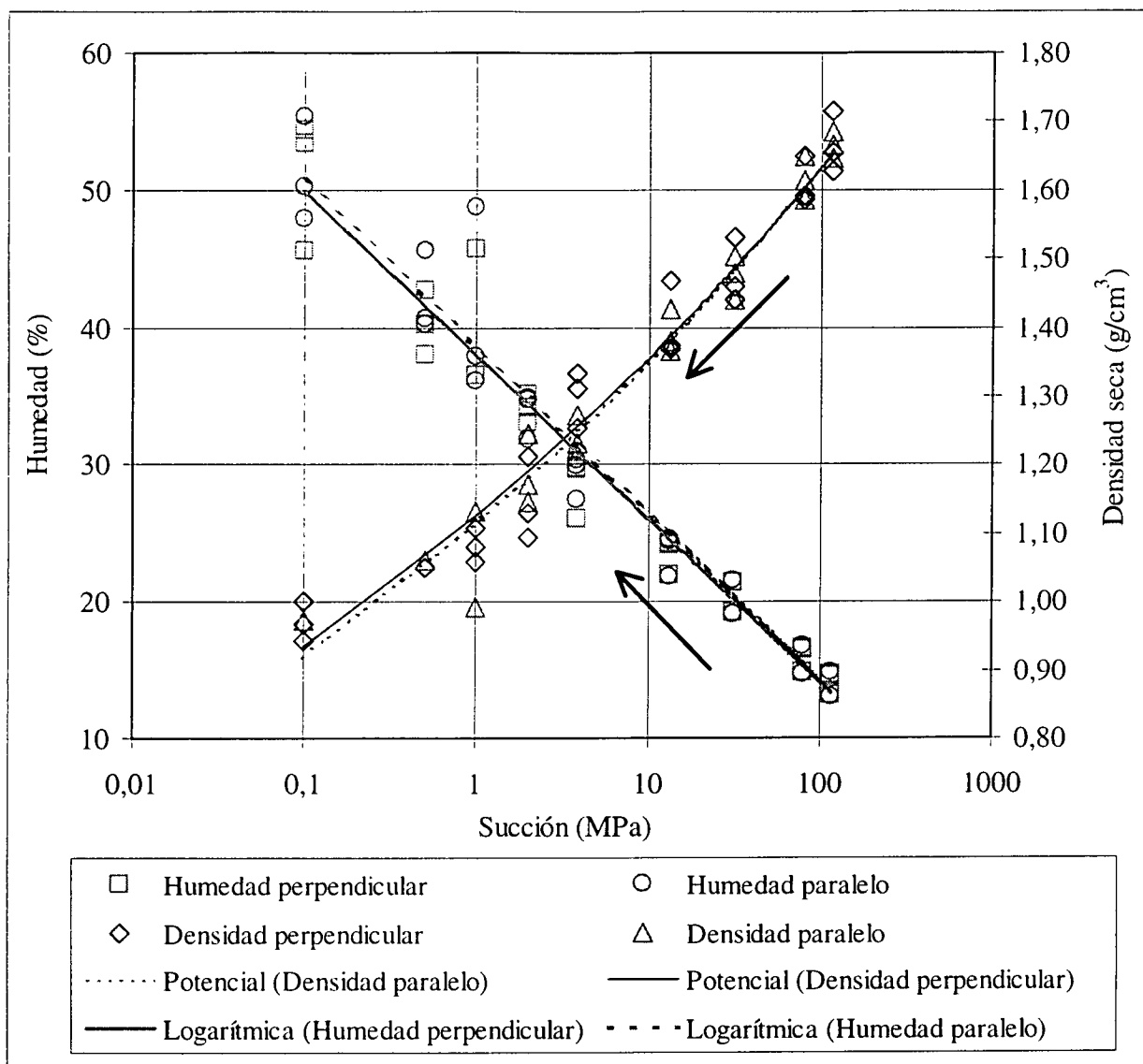


Figura 79: Densidad y humedad obtenidas en los escalones sucesivos de una trayectoria de humectación para pastillas talladas en sentido perpendicular y paralelo al esfuerzo de compactación del bloque

No existen diferencias significativas entre los valores obtenidos para pastillas talladas en una u otra dirección, por lo que se pueden obtener ajustes comunes para toda la trayectoria de humectación, desde 117 hasta 0,1 MPa, que relacionan succión con humedad y densidad seca:

$$w = -5,19 \ln s + 38,13 \quad (r^2 = 0,95, 54 \text{ puntos})$$

$$\rho_d = 1,12 s^{0,08} \quad (r^2 = 0,96, 47 \text{ puntos})$$

donde w es la humedad en %, s la succión en MPa y ρ_d la densidad seca en g/cm^3 .

Los valores obtenidos para la trayectoria de secado-humectación se muestran en la Tabla XXVII y se representan en la Figura 82 a Figura 85.

Tabla XXVII: Valores de humedad y densidad obtenidos al final de cada escalón en una trayectoria de secado/humectación para pastillas talladas en sentido perpendicular y paralelo al esfuerzo de compactación del bloque (media de 3 determinaciones)

	TALLADO PERPENDICULAR			TALLADO PARALELO		
Succión (MPa)	ρ_d (g/cm^3)	Humedad (%)	S_r (%)	ρ_d (g/cm^3)	Humedad (%)	S_r (%)
116,7	1,64	14,1	59	1,67	14,3	63
199,4	1,67	11,1	49	1,70	11,3	52
265,7	1,69	9,3	42	1,72	9,4	45
394,4	1,71	6,2	29	1,75	6,4	32
265,7	1,69	8,1	36	1,73	8,2	39
182,2	1,66	10,6	46	1,69	10,8	49
116,7	1,61	13,2	53	1,64	13,2	55
69,7	1,56	16,1	59	1,57	16,2	61
31,2	1,46	20,0	63	1,49	20,2	67
12,9	1,38	22,8	64	1,41	23,1	68
4,0	1,27	28,7	69	1,28	29,2	71
2,0	1,17	33,1	68	1,20	32,0	69
1,0	1,11	37,1	70	1,13	35,7	69
0,5	1,06	39,9	69	1,08	39,2	70
0,1	0,97	49,0	75	0,99	47,4	74

En la trayectoria de secado inicial hasta 394 MPa, las humedades alcanzadas son independientes del tipo de pastilla, y se correlacionan con la succión mediante la siguiente expresión (s , succión en MPa y w , humedad en %):

$$w = -6,42 \ln s + 44,97 \qquad (r^2 = 0,88, \text{ 24 puntos})$$

Sin embargo, aunque tampoco se han identificado diferencias entre las pastillas talladas en una u otra dirección, no es posible obtener un buen ajuste entre densidad seca y succión durante el secado, ya que se parte de densidades secas iniciales diferentes que apenas varían durante esta trayectoria inicial.

De nuevo, no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos para pastillas talladas en una u otra dirección en la trayectoria de humectación tras secado hasta 394 MPa. Incluso la densidad seca de las diferentes pastillas sigue una evolución similar, ya que durante la humectación se atenúan las diferencias iniciales, por lo que se pueden obtener los siguientes ajustes comunes para ambos tipos de pastillas:

$$w = -5,20 \ln s + 37,48 \quad (r^2 = 0,98, 69 \text{ puntos})$$

$$\rho_d = 1,13 s^{0,07} \quad (r^2 = 0,94, 69 \text{ puntos})$$

donde w es la humedad en %, s la succión en MPa y ρ_d la densidad seca en g/cm^3 .

Análisis de las curvas obtenidas

Como se ha visto en las secciones anteriores, la relación succión/humedad determinada a volumen libre para esta bentonita puede expresarse mediante una relación logarítmica entre ambas variables: la humedad de la muestra disminuye en las trayectorias de secado (aumento de la succión), y aumenta en las trayectorias de humectación (disminución de la succión). A su vez, la modificación de la densidad seca en función de la succión en estas trayectorias sigue una ley potencial. El comportamiento de pastillas talladas y compactadas responde a las mismas pautas. La influencia del tipo de trayectoria y de la densidad seca inicial en los valores de humedad y densidad seca alcanzados en cada escalón es pequeña, pero ha sido posible establecer ciertas diferencias, como se puede apreciar en los ajustes y figuras que se presentan a continuación.

Teniendo en cuenta las regresiones presentadas en las secciones anteriores para las diferentes trayectorias estudiadas –humectación, secado y humectación tras secado– y para las diferentes densidades secas iniciales con que se ha trabajado –1,60, 1,70 y 1,75 g/cm^3 , para pastillas compactadas, y un valor medio de 1,67 g/cm^3 para las pastillas talladas en

ambas direcciones– se han establecido para cada trayectoria relaciones entre succión y humedad y entre succión y densidad seca en función de la densidad seca inicial, que se ajustan a las siguientes expresiones:

$$w = (a \rho_{d0} + b) \ln s + (c \rho_{d0} + d)$$

$$\rho_d = (e\rho_{d_0} + f) s^{(g\rho_{d_0} + h)}$$

donde s es la succión en MPa, w es la humedad en %, ρ_d es la densidad seca en g/cm³, ρ_{d0} es la densidad seca inicial en g/cm³, y el resto de los símbolos son los coeficientes de los ajustes.

Los coeficientes obtenidos entre succión y humedad para cada trayectoria se muestran en la Tabla XXVIII y entre succión y densidad seca en la Tabla XXIX.

Tabla XXVIII: Coeficientes de los ajustes logarítmicos entre succión y humedad en función del tipo de trayectoria

Tipo de trayectoria	Intervalo de succión (MPa)	a	b	c	d
Humectación	148 – 0,1	-3,28	0,57	25,40	-5,52
Secado	117 – 517	5,98	-16,73	-17,67	75,96
Humectación tras secado	517 – 0,1	-4,47	2,32	30,17	-13,22

Tabla XXIX: Coeficientes de los ajustes potenciales entre succión y densidad seca en función del tipo de trayectoria

Tipo trayectoria	Intervalo de succión (MPa)	e	f	g	h
Humectación	148 – 0,1	0,18	0,83	0,06	-0,02
Secado	117 – 517	1,37	-0,92	0,05	-0,05
Humectación tras secado	517 – 0,1	0,16	0,87	0,09	-0,08

En las figuras siguientes se representan conjuntamente los valores experimentales recogidos en las tablas de las secciones anteriores y las curvas obtenidas utilizando los ajustes que se acaban de presentar, logarítmico para la relación succión/humedad y

potencial para la relación succión/densidad seca, con los coeficientes de la Tabla XXVIII y la Tabla XXIX.

La Figura 80 y la Figura 81 presentan los valores experimentales y los ajustes para las trayectorias de humectación, en el primer caso en términos de humedad y en el segundo de densidad seca. Se puede observar cómo, para una misma succión, la humedad alcanzada es mayor para las muestras con mayor densidad seca inicial y cómo, aunque para estas muestras la densidad seca se mantiene más alta durante toda la trayectoria, su disminución es mayor, por lo que al llegar a succiones por debajo de 0,5 MPa, la influencia de la densidad seca inicial en los valores de densidad seca alcanzados se hace inapreciable.

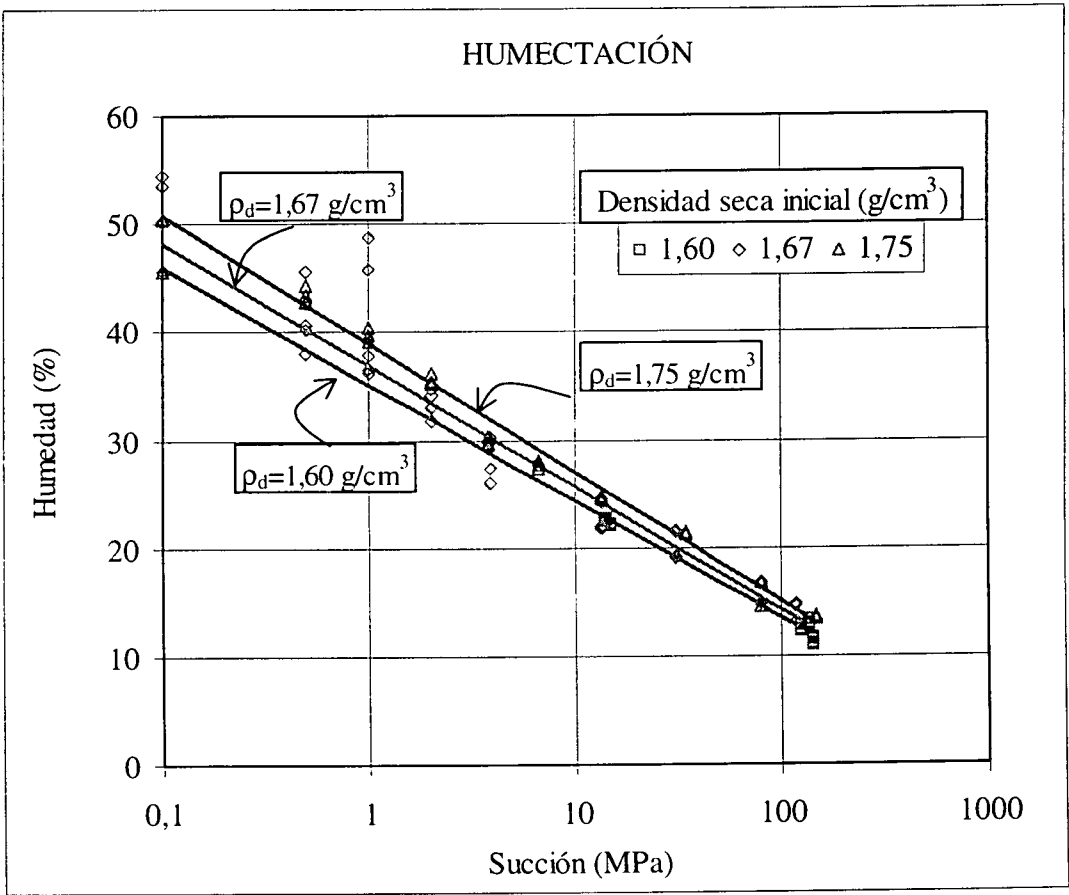


Figura 80: Valores de humedad obtenidos en trayectorias de humectación para diferentes densidades secas iniciales y ajustes en función de la densidad seca inicial

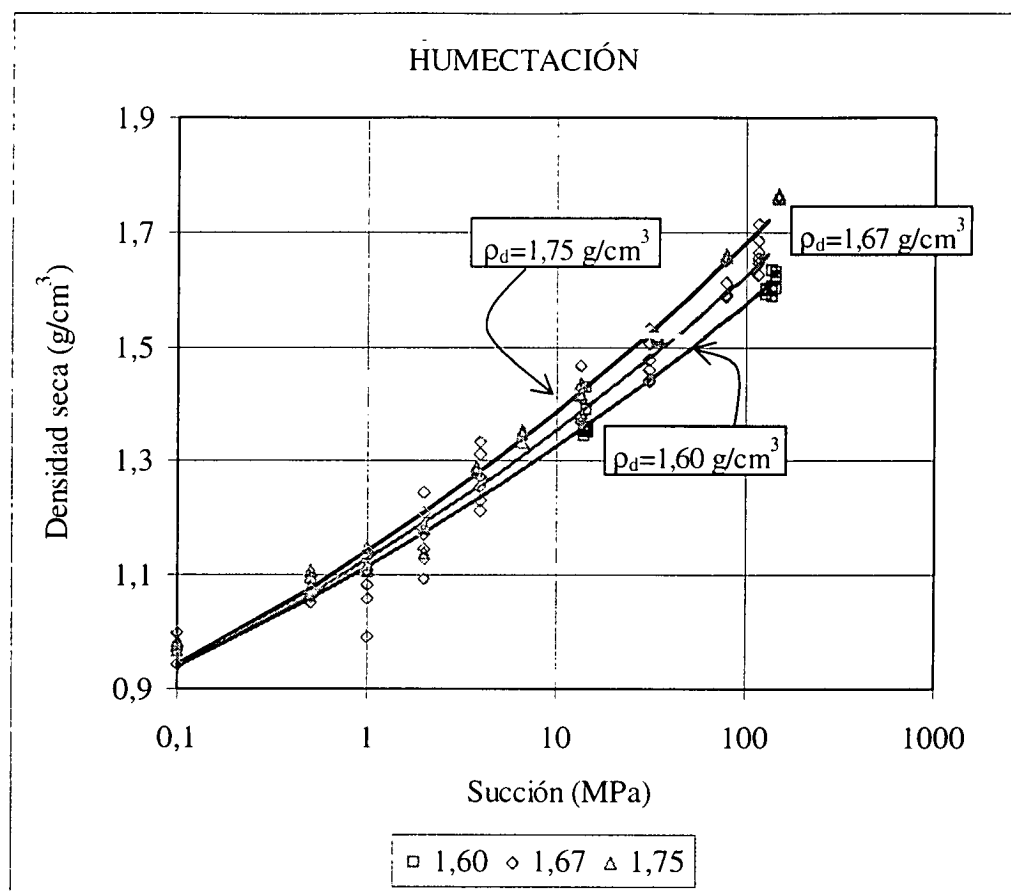


Figura 81: Valores de densidad seca obtenidos en trayectorias de humectación para diferentes densidades secas iniciales (expresadas en g/cm^3) y ajustes en función de la densidad seca inicial

La Figura 82 muestra la evolución de la humedad en función de la succión para la trayectoria de secado. Para mayor claridad la succión se expresa en escala lineal. Al igual que sucede en las trayectorias de humectación, la humedad para una misma succión es mayor cuanto mayor es la densidad seca inicial. La Figura 83 muestra la evolución de la densidad seca en las muestras sometidas a secado. La densidad seca aumenta ligeramente durante el secado por encima de 130 MPa. Debido a la dispersión de los resultados, especialmente para las pastillas talladas (cuya densidad seca inicial media es de $1,67 \text{ g/cm}^3$), los ajustes no son buenos, pero permiten apreciar que la diferencia en la densidad seca inicial se mantiene aproximadamente constante durante el secado.

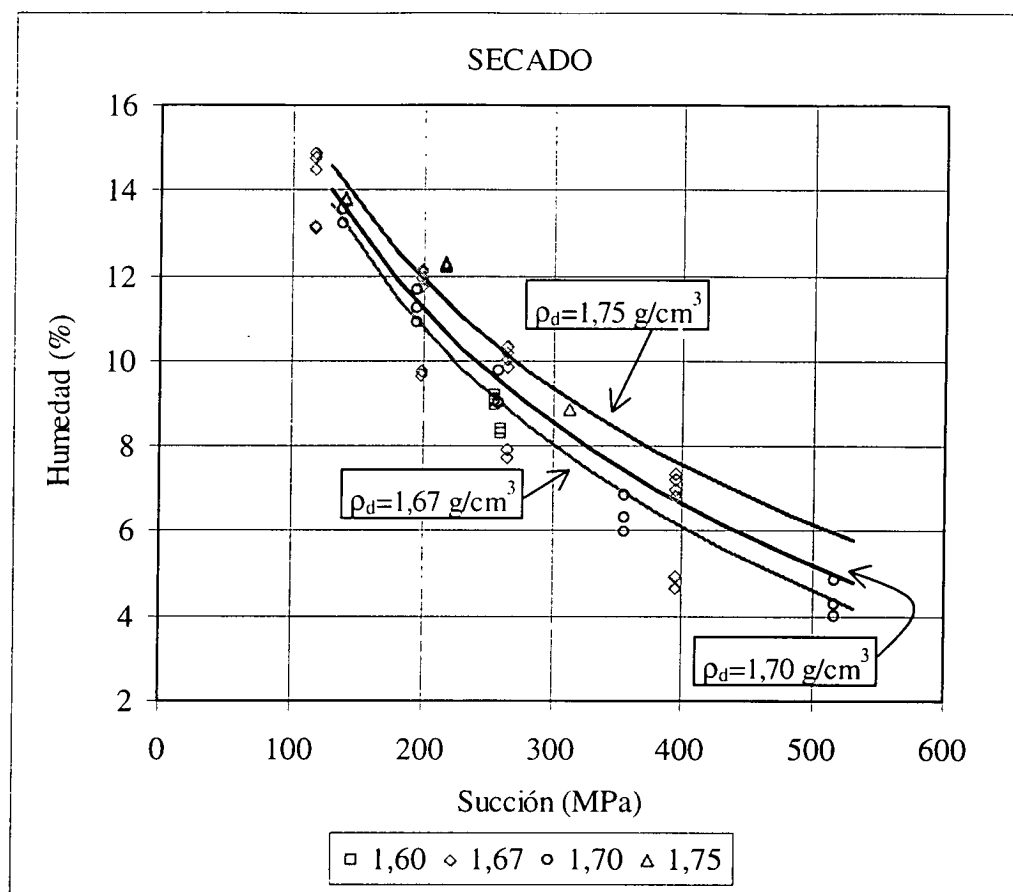


Figura 82: Valores de humedad obtenidos en trayectorias de secado para diferentes densidades secas iniciales (expresadas en g/cm^3) y ajustes en función de la densidad seca inicial

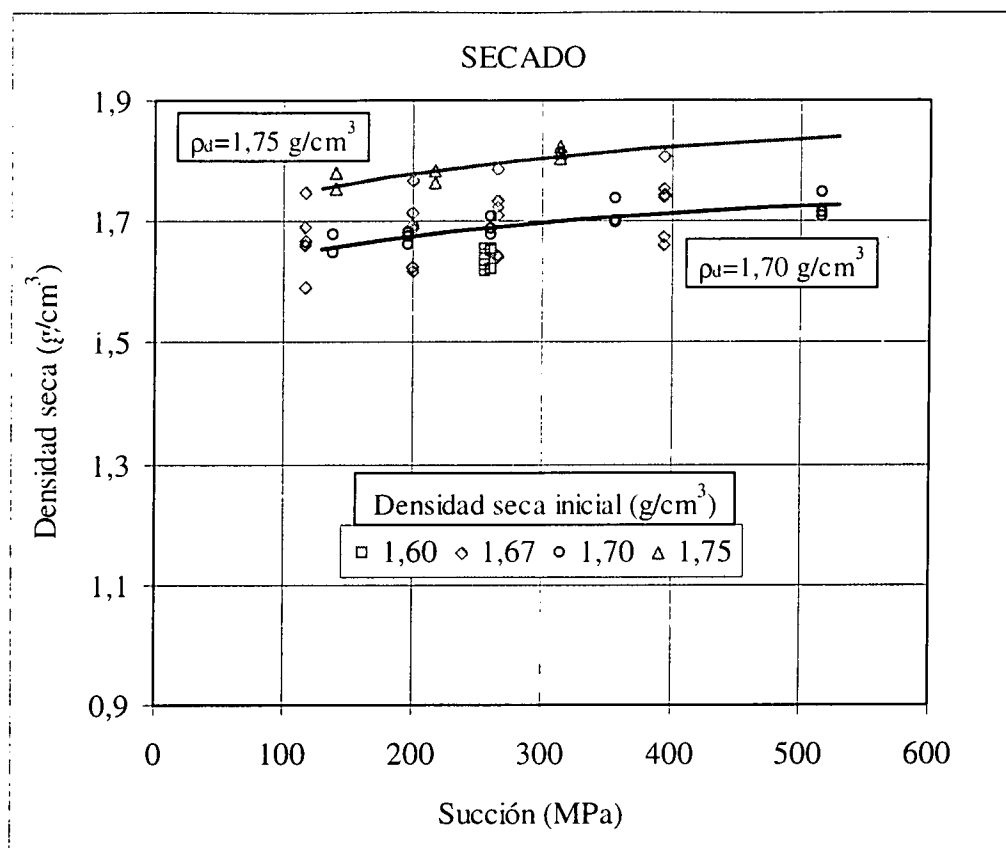


Figura 83: Valores de densidad seca obtenidos en trayectorias de secado para diferentes densidades secas iniciales y ajustes en función de la densidad seca inicial

Una vez finalizado el secado que se acaba de describir, se ha procedido a la hidratación de la muestra. Los valores de humedad y de densidad seca alcanzados durante esta trayectoria de humectación tras secado se muestran en la Figura 84 y Figura 85 respectivamente, junto con los ajustes teóricos. Las tendencias observadas son similares a las ya expuestas: mayor aumento de la humedad y mayor disminución de la densidad seca para las muestras de densidad seca inicial más alta, con lo que las diferencias en densidad seca se van haciendo cada vez menores. En cualquier caso, el grado de saturación es mayor en toda la trayectoria para las muestras con mayor densidad seca inicial (Tabla XXV y Tabla XXVII).

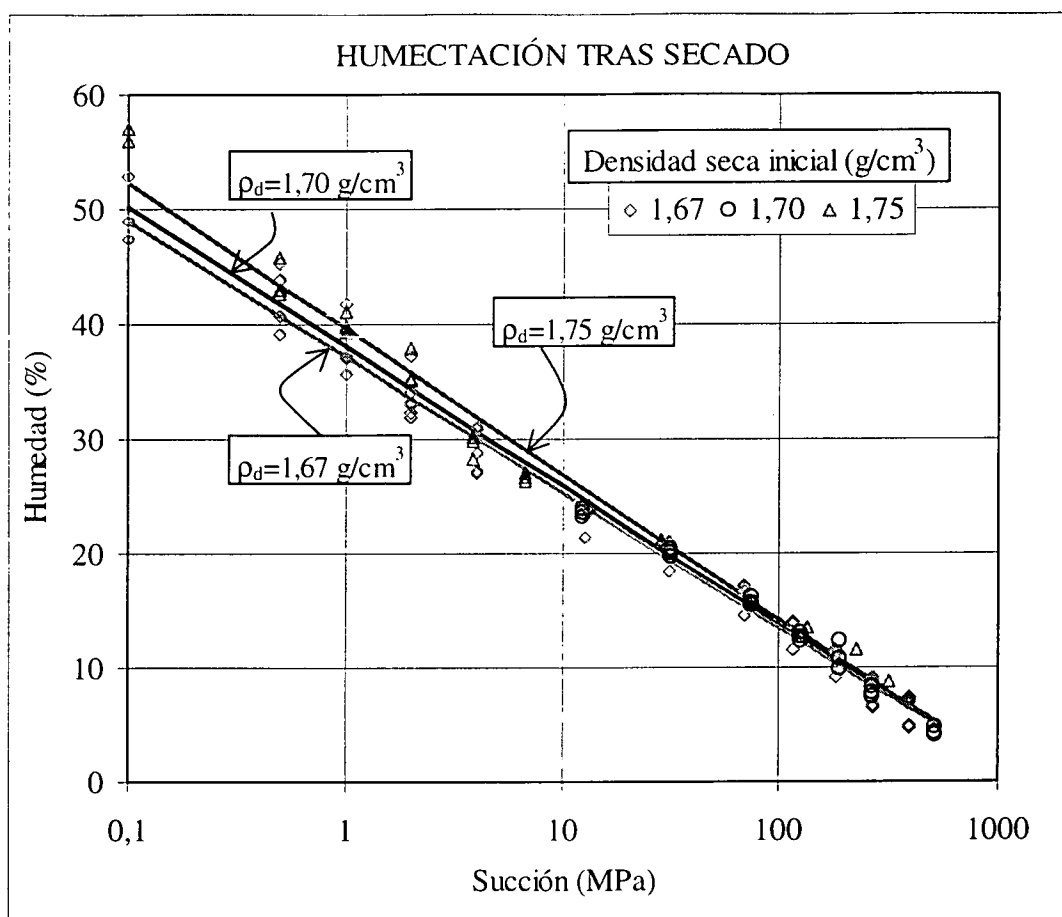


Figura 84: Valores de humedad obtenidos en trayectorias de humectación tras secado para diferentes densidades secas iniciales y ajustes en función de la densidad seca inicial

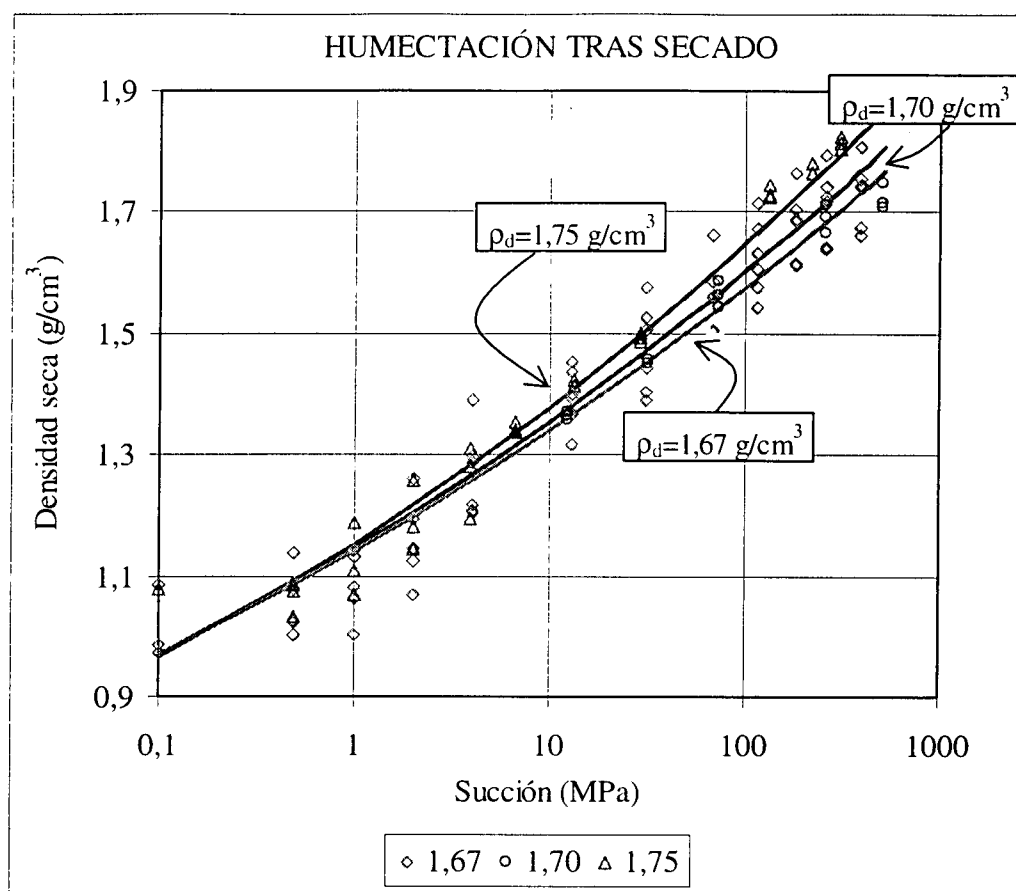


Figura 85: Valores de densidad seca obtenidos en trayectorias de humectación tras secado para diferentes densidades secas iniciales (expresadas en g/cm^3) y ajustes en función de la densidad seca inicial

Todas las curvas presentadas han sido obtenidas combinando dos técnicas diferentes de control de succión: la imposición de una humedad relativa, para las succiones altas, y la traslación de ejes para las succiones por debajo de 2 MPa. Como se indicó en la sección “TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA EL ESTUDIO DE MATERIALES EXPANSIVOS Y SUBSATURADOS”, una de las diferencias entre ambas técnicas es que en el segundo caso puede existir transferencia de iones entre la muestra y el agua al otro lado de la membrana, puesto que ésta permite el paso de solutos. Esto impide que se pueda controlar la succión osmótica. Esto no sucede con la técnica de control de la succión mediante imposición de una humedad relativa, puesto que en este caso, el intercambio de agua tiene lugar en fase vapor, por lo que no va acompañado de transferencia de solutos. De esta manera se respeta también la participación de la succión osmótica. Puesto que las curvas obtenidas en este trabajo muestran una perfecta correlación entre los valores

obtenidos con una y otra técnica, ha de suponerse que la contribución de la succión osmótica al valor total es despreciable y que la succión de esta bentonita es fundamentalmente de tipo matricial (Thomé 1993, Villar & Martín 1996, Romero 1999). Wan et al. (1995) encuentran que las variaciones de humedad en una mezcla de arena/bentonita también están condicionadas fundamentalmente por la succión matricial.

Como se ha visto en las páginas precedentes, el análisis detallado de las curvas de retención determinadas a volumen libre permite identificar la influencia de la densidad seca inicial en ellas. Para el intervalo de densidad seca analizado –que es muy limitado, entre 1,67 y 1,75 g/cm³– la repercusión de la densidad seca inicial es pequeña. Para esta misma bentonita se han determinado curvas de retención para diferentes densidades secas iniciales comprendidas entre 1,64 y 1,75 g/cm³, similares a las presentadas en este trabajo (ENRESA 2000). Sin embargo, en estudios realizados con una bentonita procedente del mismo yacimiento (de referencia S-2), no fue posible identificar la influencia de la densidad seca inicial en la relación succión/humedad a volumen libre para el intervalo de densidad seca inicial entre 1,40 y 1,95 g/cm³ (Villar 1995a). Tampoco Wan et al. (1995) identifican la influencia de la densidad seca inicial en las curvas de retención determinadas para mezclas de arena/bentonita y arena/illita. Las curvas de retención de muestras de la arcilla de Boom compactadas a densidades secas de entre 1,1 y 1,8 g/cm³ son muy similares entre sí, lo que Bernier et al. (1997) explican porque la porosidad intra-agregado y el contenido de esmectita –parámetros ambos que condicionan la succión matricial–, no se modifican por la compactación. Vemos por tanto que, en materiales con cierta expansibilidad no confinados, es frecuente considerar una única relación succión/humedad, independiente del valor de la densidad seca inicial.

El hecho de que, para una misma succión, la humedad de equilibrio sea mayor para las muestras de mayor densidad seca inicial puede explicarse si tenemos en cuenta que durante la compactación se produce un aumento de la relación entre volumen de poros pequeños y grandes a medida que aumenta la densidad seca. En una trayectoria de humectación, los poros pequeños se saturan antes, y tardan más en desaturarse durante el secado. Esto permite que las muestras de mayor densidad seca inicial, que tienen más volumen de poros pequeños, tomen más agua al comienzo de la hidratación, cuando la succión es alta. Además, la mayor expansión de las muestras de mayor densidad seca inicial, contribuye al

aumento de la porosidad durante la hidratación, y por tanto del volumen de poros accesible al agua. De esta manera, al llegar a las succiones más bajas, las densidades secas de todas las muestras se igualan en torno a un valor próximo a 1 g/cm^3 , por lo que los grados de saturación de las muestras con mayor densidad inicial –que tienen mayor humedad– son también mayores.

Por otra parte, la comparación entre las curvas correspondientes a las trayectorias de humectación y a las de humectación tras secado muestra que las humedades alcanzadas para una succión dada son algo mayores si no se ha producido secado previo, por lo que en la humectación tras secado, no se vuelve a alcanzar el valor inicial de humedad hasta llegar a una succión inferior a la inicial. Pero esta diferencia de humedad entre las trayectorias de humectación y de humectación tras secado tiende a hacerse menor a medida que la succión disminuye, llegándose incluso, a partir de cierto valor de succión, a obtener humedades mayores en muestras previamente secadas. Este valor es aproximadamente de 7 MPa para densidad seca inicial de $1,75 \text{ g/cm}^3$ y de 3 MPa para densidad seca inicial de $1,67 \text{ g/cm}^3$. Sin embargo, cuando el secado se realiza mediante calentamiento a 100°C hasta reducir la humedad a 0 %, sí se pueden inducir modificaciones irreversibles en la capacidad de rehidratación. De hecho, Rivas et al.(1991) comprobaron que la capacidad de rehidratación tras calentamiento a 100°C de la bentonita S-2, procedente del mismo yacimiento que la FEBEX, es sólo del 82 %, disminuyendo a medida que aumenta la temperatura de pretratamiento. Conviene recordar que la mínima humedad alcanzada en las curvas de retención determinadas para este trabajo está entre 4 y 6 %, por lo que probablemente el agua interlamilar de solvatación de los cationes de cambio no ha llegado a perderse.

Sin embargo, para una misma densidad seca inicial, las densidades secas de la trayectoria de humectación tras secado son similares a las de la trayectoria de humectación (Figura 86), aunque el aumento de densidad seca durante el secado inicial sea inferior a la disminución de densidad seca que se produce durante la primera parte de la humectación posterior (Tabla XXV y Tabla XXVII).

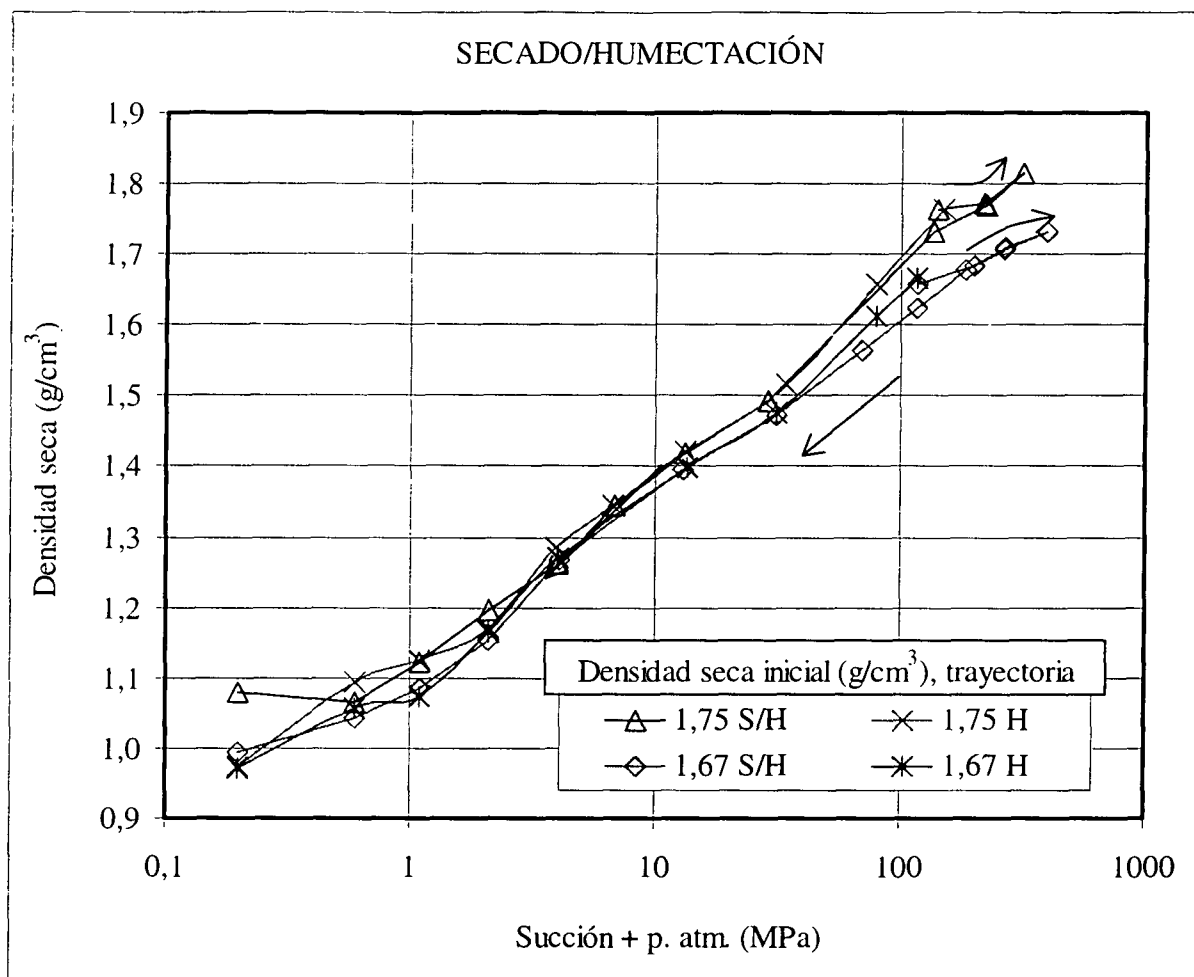


Figura 86: Evolución de la densidad seca en trayectorias de secado/humectación (S/H) y humectación (H) (valores medios de 3 ó 6 determinaciones)

Los datos obtenidos muestran que el grado de saturación no puede relacionarse con un único valor de succión total. Esto se comprueba en la Figura 87, en la que se han representado los valores de grado de saturación en función de la succión para diferentes densidades secas en trayectorias de humectación. Sin embargo, el grado de saturación es mayor para muestras de mayor densidad seca inicial durante toda la trayectoria. Ambas observaciones se han comprobado también en las trayectorias de humectación tras secado (Figura 88).

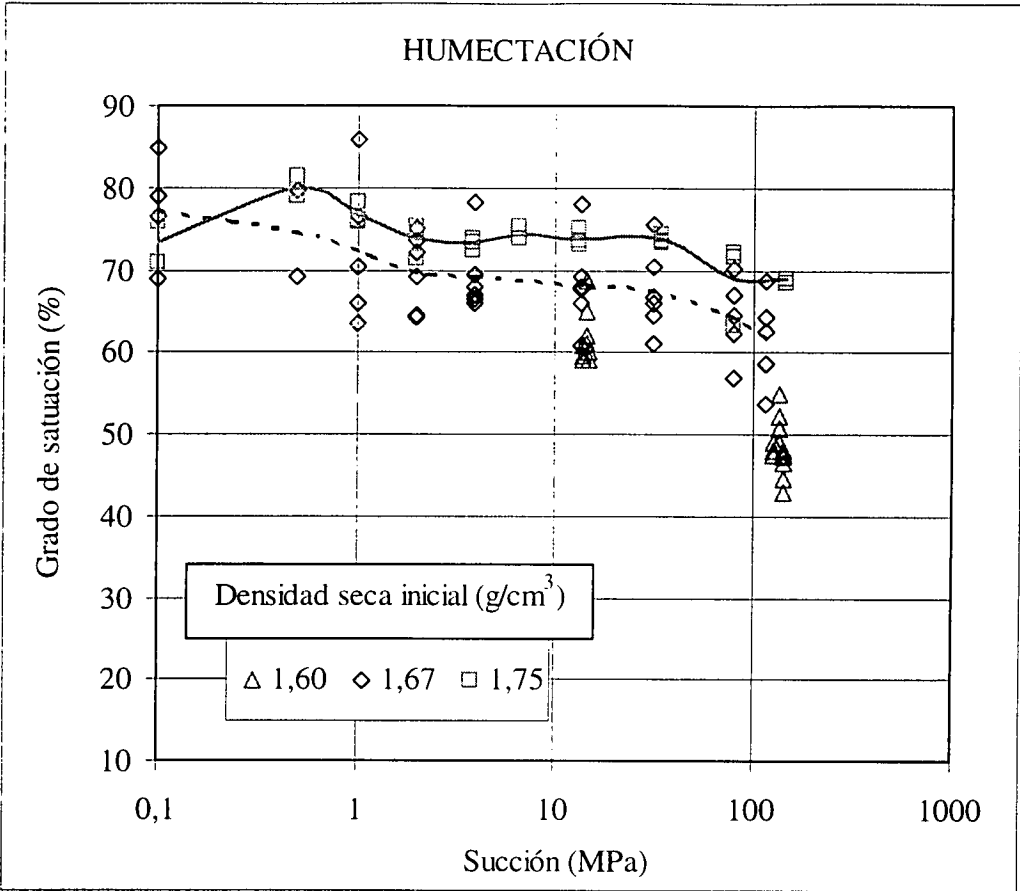


Figura 87: Valores del grado de saturación en función de la succión para diferentes densidades secas iniciales en trayectorias de humectación

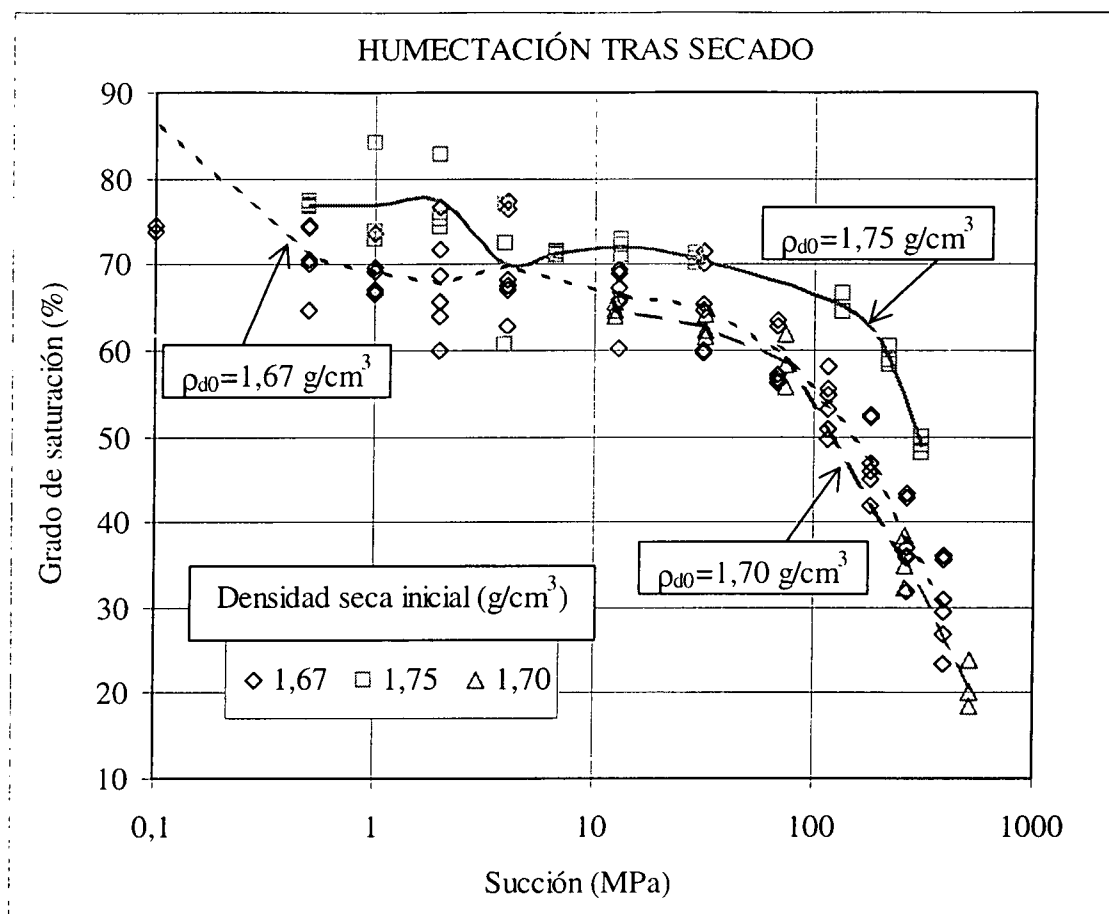


Figura 88: Valores del grado de saturación en función de la succión para diferentes densidades secas iniciales en trayectorias de humectación tras secado

Al producirse un cambio constante de la porosidad de la muestra durante la humectación, el aumento en el grado de saturación que ocasionaría el aumento de humedad, queda contrarrestado por la disminución de densidad seca, por lo que hay un intervalo de succión en el que la variación de succión apenas modifica el grado de saturación. Este intervalo de succión queda comprendido aproximadamente entre 100 y 0,5 MPa.

Varios autores que han trabajado con arcillas compactadas a volumen libre, como Wan et al. (1995) con mezclas de arena/bentonita y Romero (1999) con la arcilla de Boom, han señalado que, para determinados intervalos de succión, es más adecuado utilizar la humedad que el grado de saturación como variable de estado.

En las trayectorias de humectación tras secado se observa que, para succiones mayores de 100 MPa, la entrada de agua en la muestra produce una expansión de la estructura, y por

tanto un aumento de la porosidad (Figura 85), pero también va acompañada de una pérdida de aire, es decir, el agua que entra reemplaza al aire, por lo que se produce un aumento del grado de saturación al disminuir la succión. Por debajo de este valor de succión, la entrada de agua no va acompañada de una pérdida de aire, sino sólo de un aumento de porosidad debido a la expansión de la arcilla, por lo que el grado de saturación no aumenta, aunque sí lo haga la humedad (Figura 84). El valor en torno a los 100 MPa debe de ser por tanto el punto de salida de aire en la microestructura en trayectorias de humectación. Delage et al. (1998) encuentran para la esmectita francesa FoCa, que el valor de succión inicial en sus ensayos (113 MPa) marca la separación de dos zonas con comportamiento completamente diferente: por debajo de este valor sólo se produce intercambio de agua, permaneciendo el volumen de aire constante.

El valor de 0,5 MPa, por debajo del cual sí se produce aumento del grado de saturación, corresponde al inicio de la saturación de los poros mayores de 0,59 μm (aplicando la ley de Jurin-Laplace para succión capilar en poros cilíndricos), que pertenecen al dominio de la macroporosidad (poros medianos), y debe de ser por tanto el punto de salida de aire de la macroestructura para las trayectorias de humectación. La entrada de agua en los macroporos va acompañada de salida de aire, por lo que el grado de saturación del material aumenta. Wan et al. (1995) sugieren que para saturaciones elevadas, probablemente es posible utilizar relaciones entre grado de saturación y succión total para analizar el comportamiento del suelo.

Si los resultados presentados se expresan como contenido volumétrico de agua efectivo en función de la succión, es posible ajustar con ellos la siguiente expresión (van Genuchten 1980):

$$\theta_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^{1/m}} \right]^m$$

donde θ_e es el contenido volumétrico de agua efectivo, h es el potencial, expresado en MPa, y α y m son parámetros de ajuste. El contenido volumétrico de agua efectivo se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

donde θ es el contenido volumétrico de agua, θ_s es el contenido volumétrico saturado y θ_r es el contenido volumétrico residual, que indica la cantidad de agua que no es posible extraer sin someter la muestra a un incremento de succión muy elevado.

Para calcular el contenido volumétrico de agua efectivo se ha tomado un θ_r de 0,07. Dada la dificultad de medir o deducir gráficamente el valor de θ_r en materiales expansivos (Vanapalli et al. 1999), éste se ha tomado a la vista de los resultados experimentales, que muestran decrementos de humedad en función de la succión ($\Delta\theta/\Delta s$) del mismo orden para todo el intervalo de succiones investigado, haciéndose menores sólo para succiones por encima de 400 MPa, para las que se ha medido un contenido volumétrico de agua próximo a 0,07. Para θ_s se han tomado valores de entre 0,71 y 0,74, dependiendo de la densidad seca. Estos valores están basados en los contenidos volumétricos de agua medidos experimentalmente en muestras de diferente densidad seca inicial saturadas hasta equilibrio a volumen libre en atmósfera de humedad relativa 100 %, que han permitido comprobar que, para el intervalo de densidades secas analizado, a volumen libre las muestras no llegan a saturarse.

En las siguientes figuras se ha representado la media de los valores experimentales obtenidos para cada succión, junto con los ajustes obtenidos mediante la expresión de van Genuchten. La Figura 89 se refiere a la trayectoria de humectación y la Figura 90 a la trayectoria de humectación tras secado. Ambas curvas muestran que los valores de contenido volumétrico de agua para una misma succión son mayores para densidades secas más altas, como sucede con los grados de saturación. Los coeficientes de los ajustes, calculados mediante una técnica de ajuste de mínimos cuadrados no lineal, se muestran en la Tabla XXX. Los resultados obtenidos en las trayectorias de secado no se ajustan bien a esta expresión.

Tabla XXX: Coeficientes de los ajustes según la expresión de van Genuchten entre succión y contenido volumétrico de agua efectivo en función del tipo de trayectoria

Tipo trayectoria	ρ_d inicial (g/cm ³)	α (MPa ⁻¹)	m	θ_s	θ_r	r^2
Humectación (148-0,1 MPa)	1,67	1,86±0,34	0,17±0,01	0,710	0,07	0,989
	1,75	1,74±0,37	0,16±0,01	0,735	0,07	0,988
Humectación tras secado (394-0,1 MPa)	1,67	1,76±0,55	0,19±0,02	0,710	0,07	0,962
	1,75	1,21±0,27	0,20±0,01	0,735	0,07	0,980

Los ajustes obtenidos para la trayectoria de humectación tras secado se desvían notablemente de los valores experimentales para las succiones superiores a 100 MPa que, como hemos visto, corresponde al inicio de la succión intra-agregado. Para valorar la bondad de estos ajustes hay que tener en cuenta que el modelo de van Genuchten se desarrolló para materiales no expansivos cuyo volumen no cambia al modificarse la succión. Los datos de la curva de retención pueden ajustarse también a la expresión de van Genuchten utilizando el código RETC (van Genuchten et al. 1991), que permite determinar simultáneamente los parámetros α , m, θ_s y θ_r , considerándolos todos como simples parámetros de ajuste sin significado físico. Utilizando este código se han obtenido valores para θ_r de 0, y para θ_s de entre 0,7 y 0,8 en las trayectorias de humectación. En las trayectorias de humectación tras secado se obtienen valores de θ_s mucho mayores.

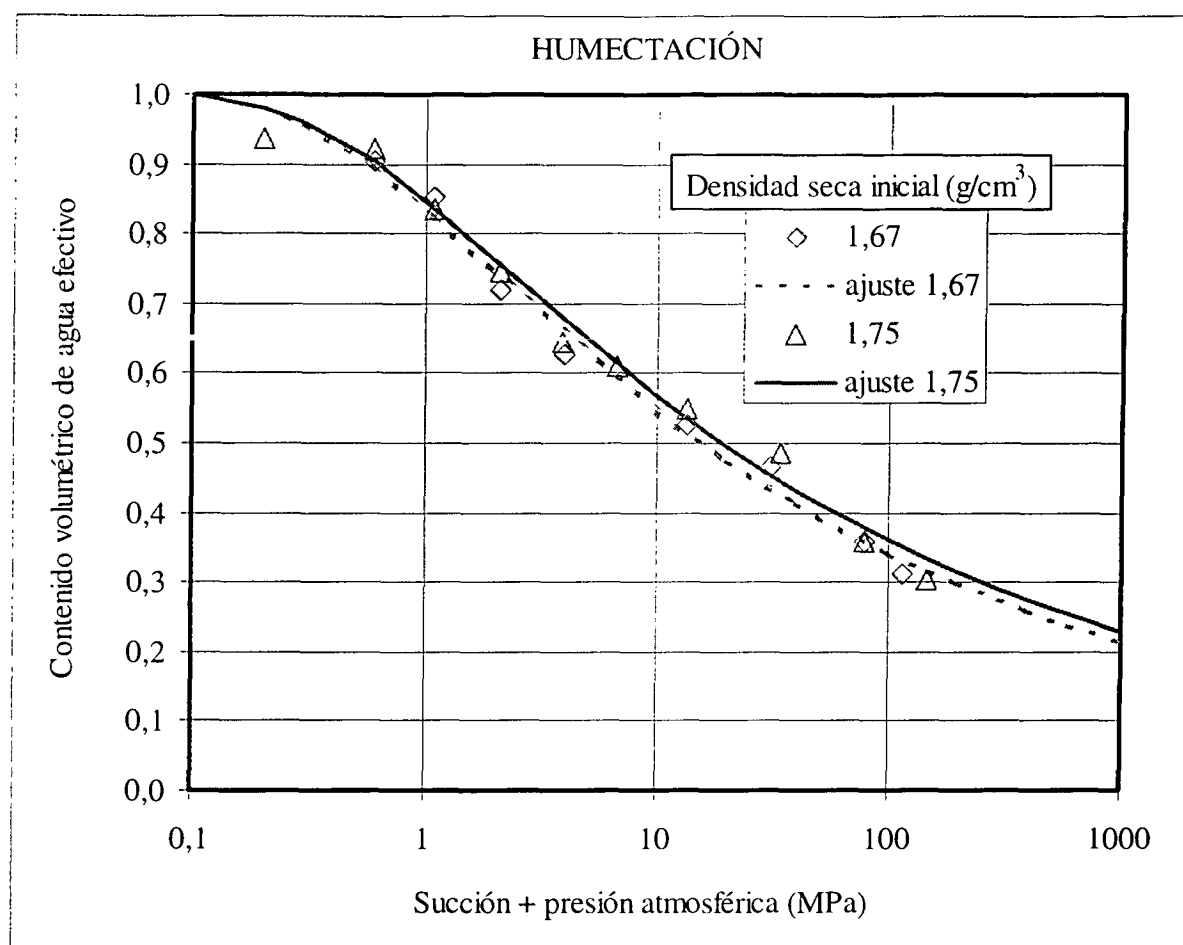


Figura 89: Valores experimentales obtenidos en trayectorias de humectación (media de 3 ó 6 determinaciones) y ajustes de la expresión de van Genuchten para diferentes densidades secas iniciales

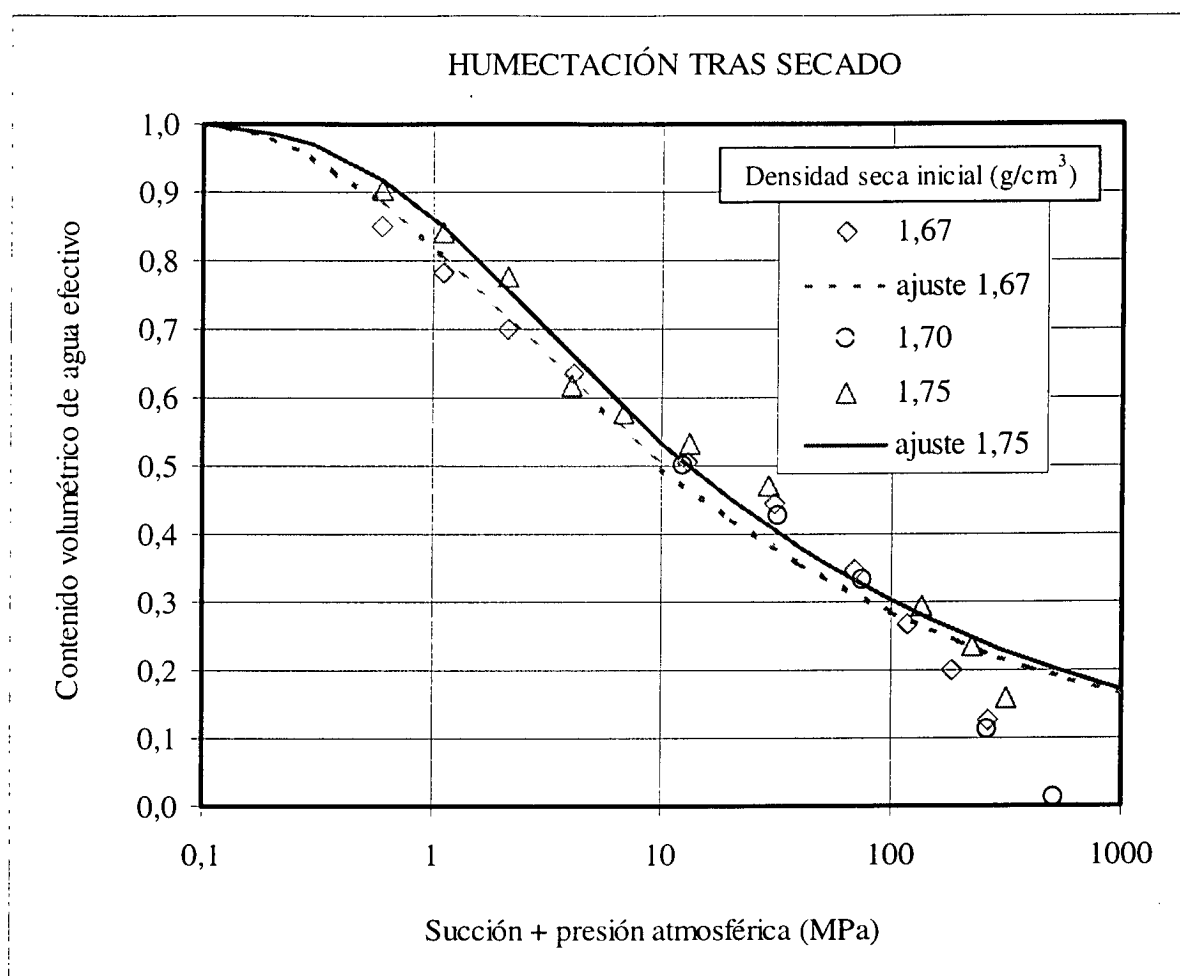


Figura 90: Valores experimentales obtenidos en trayectorias de humectación tras secado (media de 3 ó 6 determinaciones) y ajustes de la expresión de van Genuchten para diferentes densidades secas iniciales

Curva de retención a volumen constante

Cuando se realiza la determinación de las curvas de retención a volumen libre, es decir, según se ha descrito en la sección anterior, la estructura y la densidad seca de la bentonita sufren importantes cambios durante todo el proceso. Sin embargo, la situación real de la arcilla en una barrera de ingeniería no permitirá variaciones importantes de su volumen. Para conseguir, por una parte reproducir con mayor fidelidad la situación de la arcilla en el almacenamiento, y por otra, mantener una característica fundamental del material, como es su porosidad, constante durante toda la determinación, se han puesto a punto dos métodos

experimentales que permiten, además de controlar la succión aplicada, impedir la variación del volumen de la muestra durante el ensayo.

Estos métodos son: la determinación de la curva de retención en edómetro con succión controlada y la utilización de celdas perforadas indeformables en atmósfera de humedad relativa controlada. Los procedimientos experimentales se describen en la sección “Curva de retención a volumen constante”. El primero de ellos se ha empleado para la determinación de las curvas a 20 °C, y el segundo, desarrollado posteriormente, para la determinación de la curva a 40 °C. El control dimensional de la muestra, que sólo se consigue en las trayectorias de humectación, es mucho mejor cuando se utilizan las celdas indeformables, que fueron diseñadas específicamente para este tipo de ensayo.

Curva de retención a 20 °C

Para determinar la curva de retención a 20 °C se han utilizado los edómetros con succión controlada, descritos en la sección “Ensayos edométricos con succión controlada”, que permiten el control de la succión mediante dos técnicas diferentes. Para las succiones superiores a 3 MPa se ha utilizado el control de la humedad relativa de la atmósfera que rodea la muestra, introduciendo en los recipientes del interior de la celda del edómetro (Figura 48) disoluciones de ácido sulfúrico de porcentajes en peso entre 6 y 67 %. Para succiones de entre 14 y 0,1 MPa se ha utilizado la técnica de traslación de ejes, imponiendo la presión de nitrógeno deseada en el interior de la celda del edómetro (Figura 47).

En los edómetros sólo se puede mantener constante el volumen de la muestra durante las trayectorias de humectación, ya que el hinchamiento se puede evitar cargando la muestra, pero no la retracción que se produce al desecar. Por otra parte, es difícil conseguir el control perfecto del volumen de la muestra, y durante el ensayo se produce cierta variación en la densidad seca, especialmente en los casos de densidades secas elevadas cuyo hinchamiento no se puede contrarrestar completamente con la capacidad de los equipos.

Se han utilizado pastillas obtenidas por compactación uniaxial, directamente en el anillo del edómetro, de la arcilla con su humedad higroscópica. Estas pastillas tienen densidades

secas iniciales de 1,60, 1,65 y 1,70 g/cm³, siendo su altura de 1,20 cm y su sección de 11,40 ó 19,24 cm².

En la siguiente tabla se muestran las características de los ensayos realizados. Puesto que todas las muestras tienen inicialmente su humedad higroscópica, que equivale a una succión de aproximadamente 130 MPa, en los ensayos realizados en edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno, en los que la máxima succión aplicable es 14 MPa, la muestra sufre al principio una disminución brusca de succión, con la consiguiente hidratación. Se han seguido trayectorias de humectación, comenzando bien por 14 MPa en el caso de los edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno, o bien por 130 MPa en los edómetros con control de succión mediante disoluciones. Este valor se ha elegido porque es la succión de la arcilla compactada con su humedad higroscópica, y por tanto, la que tienen inicialmente los bloques fabricados para los ensayos *in situ* y en maqueta del Proyecto FEBEX. En algunos casos, tras la saturación se ha seguido una trayectoria de secado.

Tabla XXXI: Ensayos realizados para la determinación de la curva de retención a volumen constante a 20 °C

Referencia	Densidad seca (g/cm ³)	Control de succión	Trayectoria* (MPa)
EDN1_6	1,59	Nitrógeno	14-0
EDN4_8	1,60	Nitrógeno	0-14-0
EDN5_7	1,75	Nitrógeno	0-14-0
EDS1_11	1,75	Disoluciones	114-2-476
EDS5_6	1,64	Disoluciones	118-1-130

*El valor inicial de succión en todos los casos es aproximadamente 130 MPa (HR del laboratorio)

En las siguientes tablas se resumen las características de la muestra al final de cada escalón en los diferentes ensayos realizados. En los ensayos realizados con presión de nitrógeno se ha indicado en las tablas como escalón inicial las condiciones de la muestra compactada antes de iniciar el ensayo. Se incluye también la presión que se necesita ejercer para mantener el volumen constante en cada escalón, lo que indica la presión de hinchamiento de la arcilla para diferentes succiones. El grado de saturación reflejado en las tablas se ha calculado considerando que la densidad del agua es 1,00 g/cm³, es decir, la del agua libre.

Como se explica en la sección “DENSIDAD DEL AGUA”, esto puede no ser cierto cuando la muestra se satura a volumen constante, y por este motivo se han obtenido grados de saturación “ficticios” superiores a la unidad. Por otra parte, se puede observar que, a medida que progresa la hidratación, se produce una disminución de la densidad seca que, especialmente en el caso de los edómetros con succión controlada mediante presión de nitrógeno, puede llegar a ser importante.

Tabla XXXII: Resultados de la curva de retención en trayectoria de humectación a densidad seca nominal 1,60 g/cm³ (EDN1_6)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r^*
130,0	1,59	12,8	0,49
14,0	1,58	23,8	0,90
8,0	1,58		
5,0	1,58	27,1	1,03
3,0	1,58	27,9	1,06
1,5	1,58	29,0	1,10
0,5	1,58	29,8	1,13
0,1	1,58	29,2	1,11
0,0	1,58	29,8	1,13

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla XXXIII: Resultados de la curva de retención en trayectoria de humectación/secado/humectación a densidad seca nominal 1,60 g/cm³ (EDN4_8)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r^*	P_s (MPa)
130,0	1,60	14,4	0,57	0,0
0,0	1,53	27,9	0,99	5,7
0,1	1,53	28,1	1,00	5,7
0,5	1,53	27,6	0,98	5,7
1,5	1,54	26,3	0,94	5,6
3,0	1,54	27,1	0,98	5,6
5,0	1,56	26,0	0,96	5,5
8,0	1,58	24,9	0,95	5,4

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r [*]	P _s (MPa)
14,0	1,62	23,0	0,93	5,1
8,0	1,61	23,3	0,93	5,4
3,0	1,60	23,8	0,94	5,5
1,5	1,59	25,7	0,99	5,5
0,5	1,58	25,6	0,98	5,5
0,1	1,49	32,2	1,08	5,6
0,0	1,49	30,4	1,02	5,6

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla XXXIV: Resultados de la curva de retención en trayectoria de humectación/secado/humectación a densidad seca nominal 1,75 g/cm³ (EDN5_7)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r [*]	P _s (MPa)
130,0	1,75	13,4	0,67	0,0
0,0	1,65	26,5	1,13	9,4
0,1	1,64	26,1	1,09	9,4
0,5	1,62	26,5	1,08	9,4
1,5	1,63	26,5	1,08	9,3
3,0	1,64	25,6	1,07	9,2
5,0	1,66	25,6	1,11	9,1
8,0	1,67	24,9	1,08	8,9
14,0	1,71	24,3	1,14	8,2
8,0	1,70	24,0	1,09	8,2
5,0	1,68	24,4	1,09	8,4
3,0			1,25	8,5
1,5	1,68	25,1	1,12	8,6
0,5	1,65	25,4	1,08	8,7
0,1	1,68	25,3	1,12	8,7
0,0	1,68	25,9	1,15	8,7

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla XXXV: Resultados de la curva de retención en trayectoria de humectación/secado a densidad seca nominal 1,75 g/cm³ (EDS1_11)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r [*]	P _s (MPa)
114	1,75	13,4	0,67	0,4
75	1,74	16,3	0,80	2,4
31	1,74	19,3	0,94	9,6
14	1,72	22,2	1,04	9,6
4	1,69	24,7	1,12	9,6
2	1,69	26,4	1,20	9,6
4	1,69	25,9	1,17	9,6
13	1,69	24,5	1,11	9,6
34	1,72	21,6	1,03	9,6
72	1,75	19,4	0,97	6,4
132	1,77	14,6	0,74	0,1
179	1,77	12,0	0,62	0,1
251	1,77	8,2	0,42	0,1
476	1,79	6,0	0,32	0,1

^{*}Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla XXXVI: Resultados de la curva de retención en trayectoria de humectación/secado a densidad seca nominal 1,67 g/cm³ (EDS5_6)

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r [*]	P _s (MPa)
118	1,67	13,0	0,56	0,0
73				0,3
33				3,5
14	1,61	19,3	0,78	4,5
4	1,61	27,7	1,12	5,4
1	1,58	28,5	1,15	5,6
4	1,59	29,3	1,18	5,6
13	1,58	29,0	1,17	5,4
22	1,63	28,8	1,19	5,6

Succión (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r^*	P_s (MPa)
60	1,68	19,6	0,87	1,6
130	1,69	16,3	0,75	1,6

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Las humedades alcanzadas en el transcurso de las trayectorias de humectación se representan en la Figura 91. Se han incluido también en la figura los ajustes entre succión y humedad para el mismo tipo de trayectoria obtenidos en ensayos a volumen libre. Los intervalos de densidad seca indicados en la figura corresponden a los valores al comienzo y al final de la trayectoria. Es particularmente notable la diferencia entre los valores de humedad alcanzados en las trayectorias a volumen libre y a volumen constante. En las trayectorias a volumen libre la humedad alcanzada para una misma succión es mayor que en las de volumen constante, aumentando la diferencia entre ambas a medida que disminuye la succión. El valor de succión a partir del cual la diferencia entre ambas trayectorias se hace más acusada es más alto para las densidades más altas. Así, para densidad seca de 1,75 g/cm³ este valor está en torno a 30 MPa, y para densidad seca de 1,60 g/cm³ en torno a 8 MPa, en ambos casos cuando la muestra está ya próxima a la saturación y es necesario aplicar la máxima carga vertical para contrarrestar el hinchamiento. Además, puede observarse cómo, contrariamente a lo que sucedía en las trayectorias a volumen libre, la humedad alcanzada para una misma succión es mayor cuanto menor es la densidad seca inicial, aunque esta diferencia sólo se aprecia para succiones por debajo de 14-30 MPa.

Romero (1999) señala que para la arcilla de Boom existe un intervalo de succión, entre 200 y 2 MPa, en el que la densidad seca tiene muy poca influencia sobre el valor de humedad alcanzado para determinada succión, debido a que las transferencias de agua se producen a nivel de intra-agregado y dependen de la superficie específica de la arcilla, es decir, de su composición mineralógica. Sin embargo, este autor advierte del error que puede cometerse si estas relaciones succión/humedad, determinadas sin tener en cuenta la densidad seca inicial, se extrapolan para succiones por debajo del límite inferior del intervalo. Efectivamente, como se puede apreciar en las distintas curvas ajustadas en este trabajo, la repercusión de la densidad seca inicial sobre la humedad alcanzada es más

patente a medida que disminuye la succión; pero en el caso de la bentonita FEBEX, el límite inferior de succión por encima del cual no se registra la influencia de la densidad seca inicial, está entre los 8 y los 30 MPa, dependiendo de la densidad seca (Figura 91). Es decir, mientras en una arcilla poco expansiva, como la arcilla de Boom, el límite inferior de la succión intra-agregado está en 2 MPa, en una arcilla muy expansiva, como la FEBEX, se sitúa en valores mayores, lo que refleja también las diferencias en la porosidad reactiva de ambas.

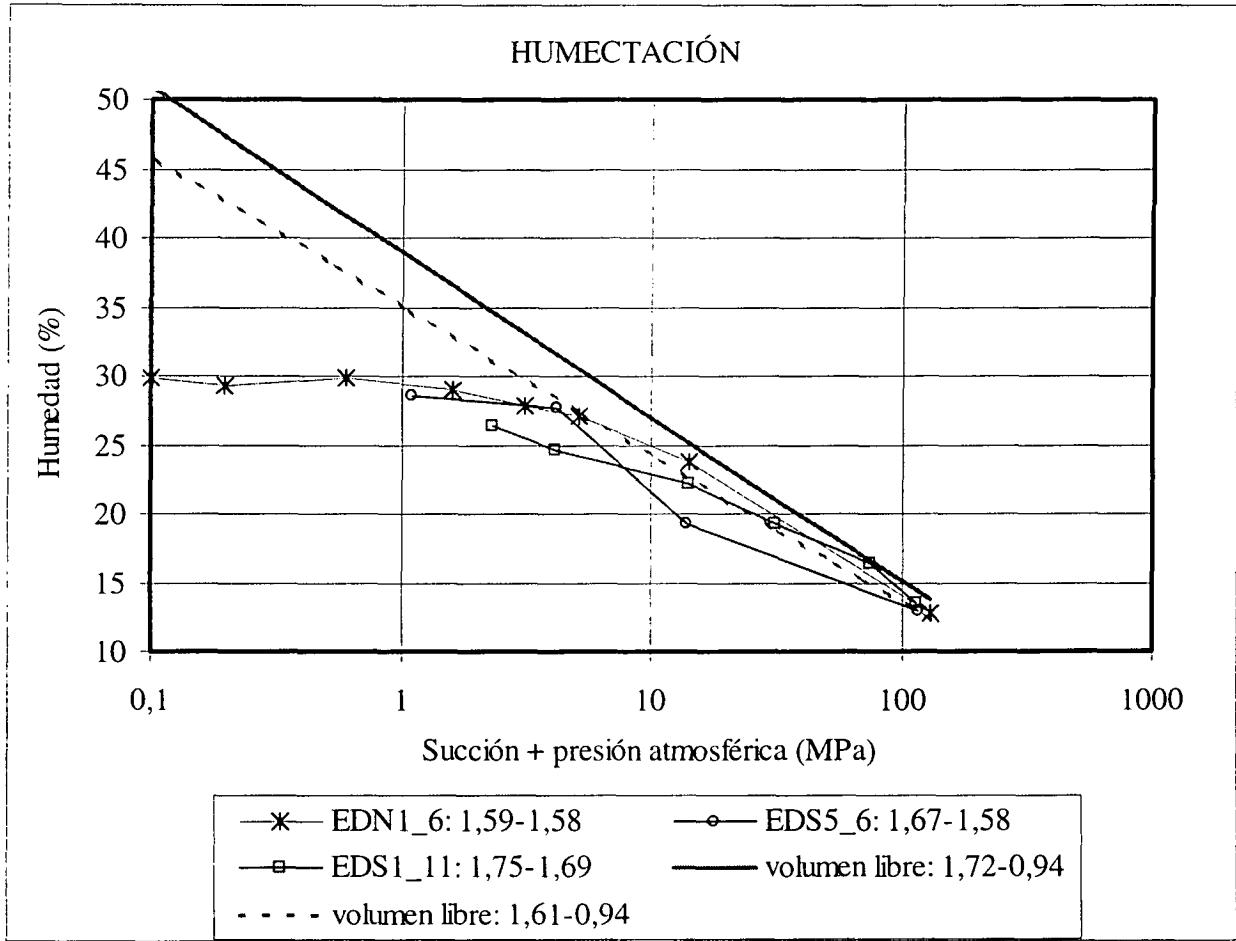


Figura 91: Valores de humedad alcanzados en las trayectorias de humectación a volumen constante comparados con los obtenidos a volumen libre para diferentes densidades secas (expresadas en g/cm³)

Además, a diferencia de lo que sucedía en las curvas determinadas a volumen libre, las muestras confinadas llegan a alcanzar la saturación total, para un valor de succión que es más alto a medida que la densidad seca es mayor. Así, las muestras de densidad seca 1,75 g/cm³ están saturadas por debajo de succión 14 MPa, mientras que para muestras de

densidad seca $1,60 \text{ g/cm}^3$ este valor está en torno a 4-5 MPa, lo que se debe probablemente al menor diámetro medio de los poros en las muestras compactadas a mayor densidad. La Figura 92 muestra la variación del grado de saturación con la succión en estas trayectorias de humectación. Se puede observar que los grados de saturación calculados utilizando el valor $1,00 \text{ g/cm}^3$ para la densidad del agua son mayores que la unidad. En estas curvas no se distingue un valor de salida de aire de la macroporosidad, como sucedía en las curvas determinadas a volumen libre. Esto es debido a que, al estar en condiciones confinadas, los poros intra-agregado invaden el espacio ocupado por los inter-agregado, porque la saturación a volumen constante induce la desaparición de los macroporos a favor de poros más pequeños, con lo que se reduce el tamaño medio de los poros.

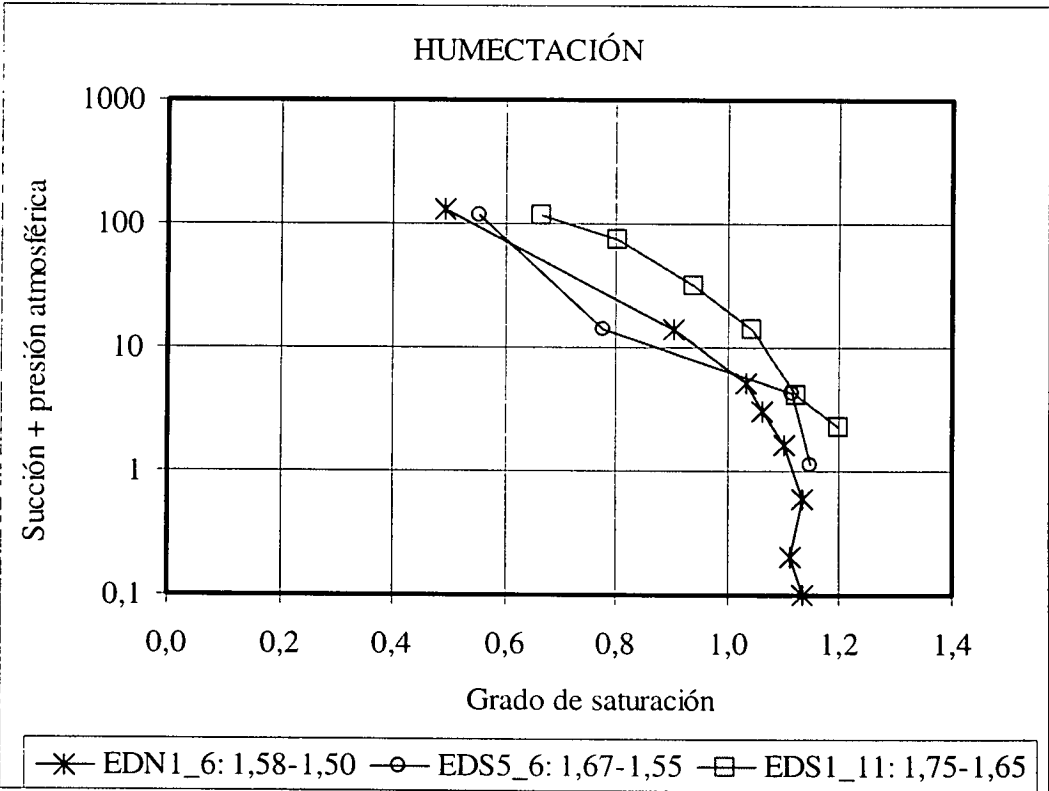


Figura 92: Curvas de retención a volumen constante para diferentes densidades secas (expresadas en g/cm^3)

Dos de los ensayos representados en la Figura 91, el EDS1_11 y el EDS5_6, continuaron con el secado de la muestra. La humedad alcanzada en cada escalón, tanto en la trayectoria de humectación ya vista como en la de secado, se muestra en la Figura 93. Se observa el efecto de la histéresis –más notable en la muestra de menor densidad– por el que la

humedad alcanzada durante la trayectoria de secado es mayor que la que se obtuvo para la misma succión durante la humectación previa. Así por ejemplo, cuando se hidrata una muestra de densidad seca $1,75 \text{ g/cm}^3$ desde las condiciones iniciales de equilibrio, el grado de saturación se hace 1 por debajo de succiones de 14 MPa. Al volver a aumentar la succión aplicada, no empieza a desaturarse la muestra hasta alcanzar valores superiores a 40 MPa (ensayo EDS1_11). A este hecho contribuye seguramente la disminución de volumen que experimenta la muestra durante el secado, que no es posible evitar, y que produce un aumento del grado de saturación. En el ensayo EDS1_11 la muestra llega a desecarse hasta un valor de humedad de 6 % para succión de 476 MPa, con un grado de saturación de 0,32, que no es demasiado bajo debido a que la densidad seca sufre un incremento importante durante el secado.

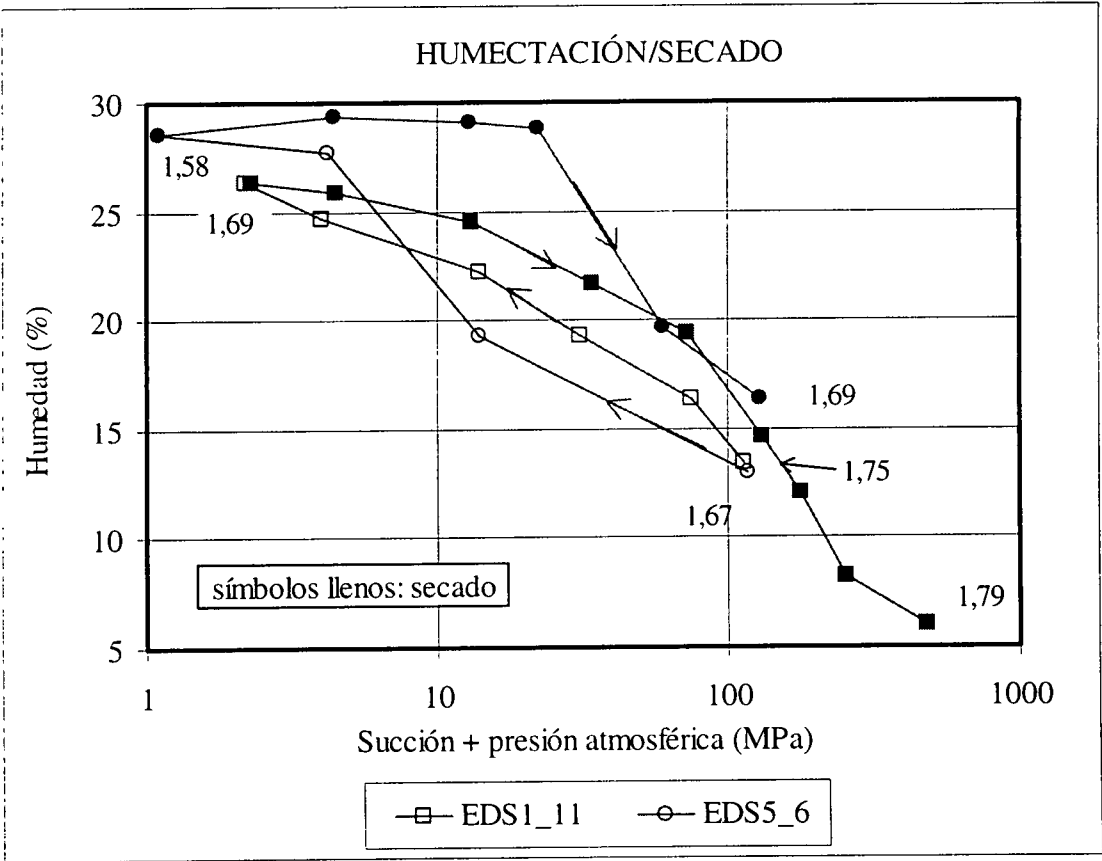


Figura 93: Valores de humedad alcanzados en las trayectorias de humectación/secado a volumen constante (las densidades secas correspondientes a los extremos de cada trayectoria se indican en g/cm^3)

En la Figura 94 se vuelven a representar los valores correspondientes a la trayectoria de secado tras humectación de los dos ensayos anteriores, junto con los correspondientes a los ensayos EDN4_8 y EDN5_7. En estos últimos, la trayectoria de humectación inicial consta de un único escalón, al pasar la muestra al colocarse en el edómetro al comienzo del ensayo, de los 130 MPa –correspondientes a la humedad higroscópica–, a 0 MPa; empezando a continuación el secado de la muestra. Se ha incluido también en la figura el ajuste entre succión y humedad para la trayectoria de secado obtenido en ensayos a volumen libre. Esta última curva se ha obtenido para valores de succión superiores a 139 MPa en muestras que no se habían hidratado previamente, por lo que no se corresponde exactamente con la trayectoria seguida a volumen constante. Los intervalos de densidad seca indicados en la figura corresponden a los valores al comienzo y al final de la trayectoria. Durante el secado, sólo para succiones superiores a 14 MPa se produce una disminución apreciable de la humedad, que se hace más notable a partir de un valor de succión algo mayor. Este valor probablemente es diferente para cada densidad seca, aunque no hay suficientes datos experimentales para corroborarlo. Para succiones superiores a este valor límite, las curvas obtenidas a volumen libre y constante coinciden, puesto que en ninguno de los dos casos es posible evitar la retracción de la muestra, con lo que la diferencia entre ambos métodos desaparece.

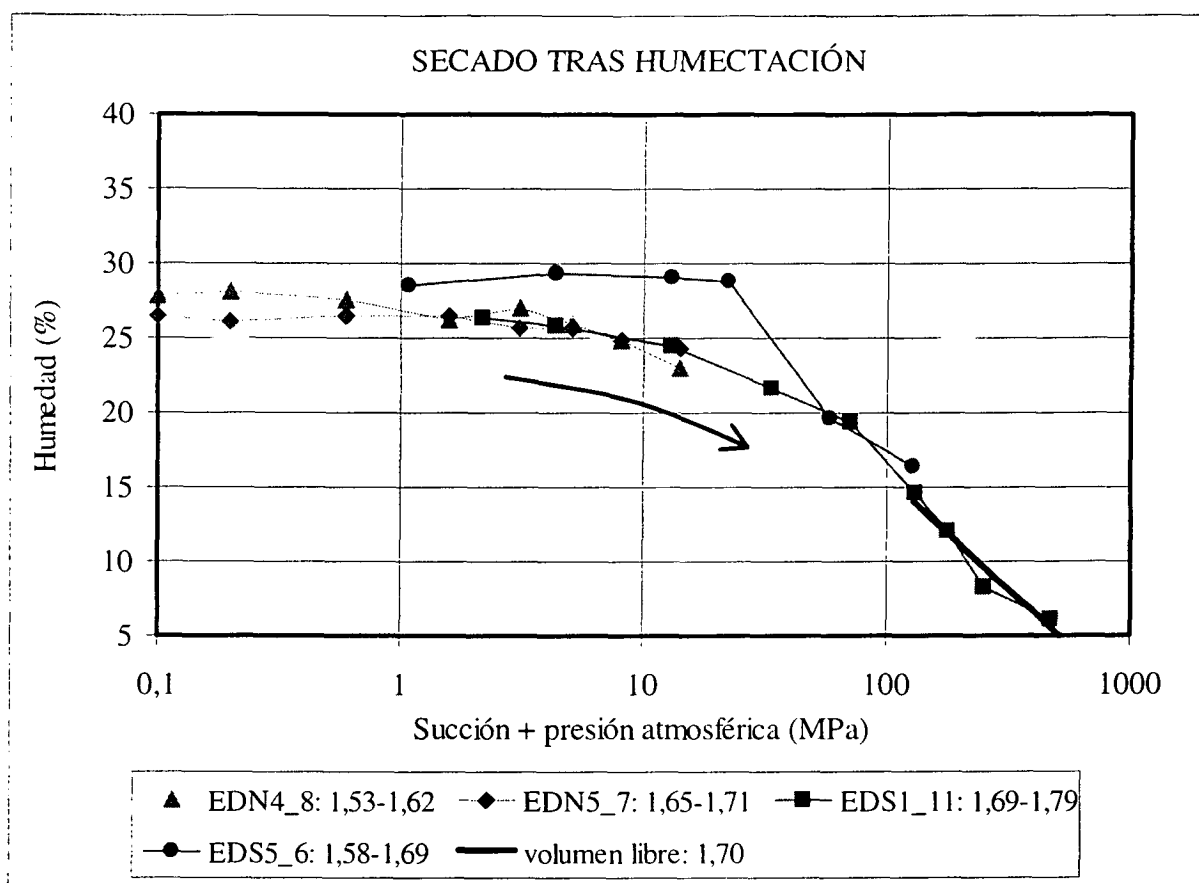


Figura 94: Valores de humedad alcanzados en las trayectorias de secado tras humectación a volumen constante comparados con los obtenidos a volumen libre (secado) para diferentes densidades secas (expresadas en g/cm^3)

Los resultados del ciclo completo de humectación/secado/humectación para los ensayos EDN4_8 y EDN5_7, que se acaban de presentar parcialmente, se muestran en la Figura 95. Vuelve a observarse el efecto de la histéresis, que lleva a valores de humedad mayores para una misma succión durante la trayectoria de secado tras humectación que durante la de humectación posterior. Pero esta diferencia se hace menor al llegar a las succiones más bajas, al igual que sucedía en las curvas determinadas a volumen libre.

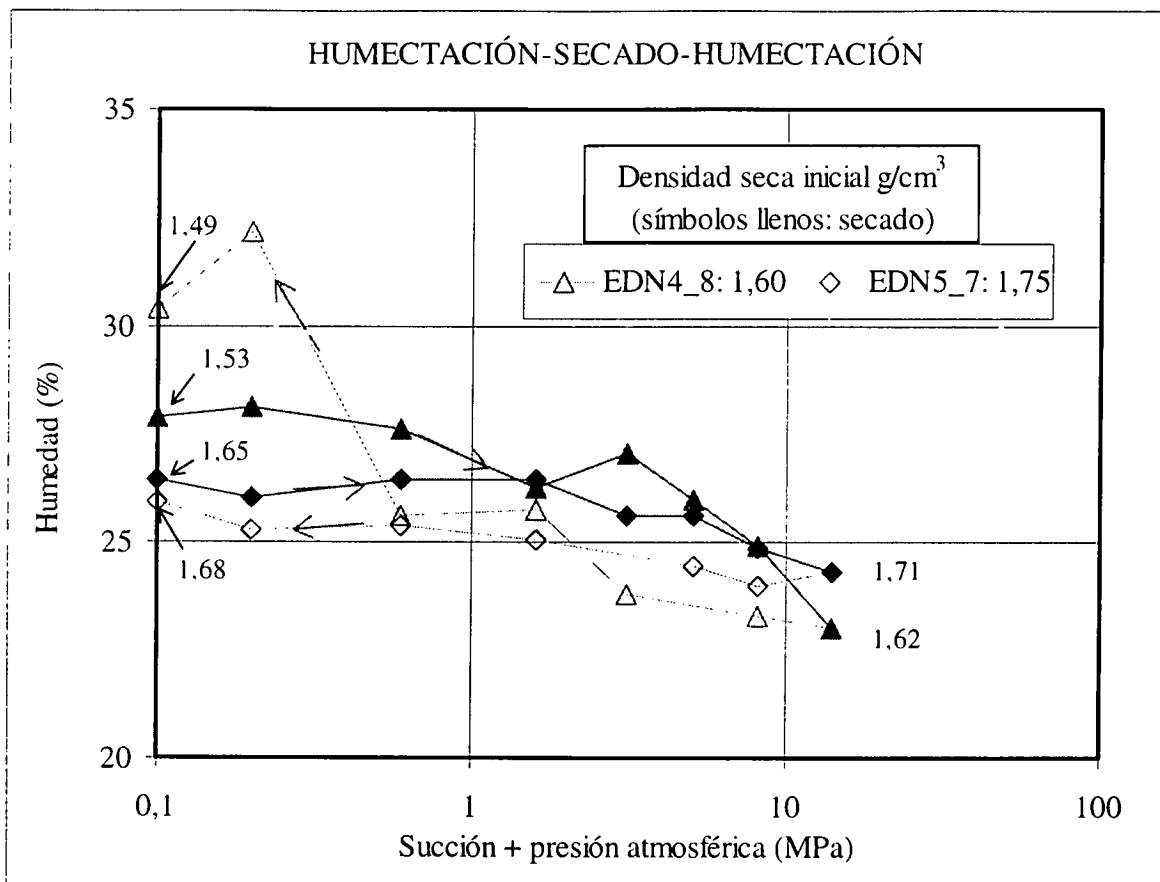


Figura 95 Valores de humedad alcanzados en las trayectorias de humectación/secado/humectación a volumen constante. La humectación inicial consta de un único escalón. Las densidades secas correspondientes a los extremos de cada trayectoria se indican en g/cm³

Curva de retención a 40 °C

Puesto que la arcilla en la barrera de un almacenamiento estará sujeta a diferentes temperaturas –en función de su posición exacta con relación al contenedor y del tiempo transcurrido desde la instalación de éste–, surge la necesidad de comprobar si las curvas de retención determinadas a 20 °C son válidas para temperaturas mayores. Este aspecto se ha abordado de forma preliminar en este trabajo, con la determinación de dos curvas de retención a 40 °C. Para ello se han diseñado unas celdas cilíndricas que impiden la variación del volumen de la muestra –que se compacta directamente en ellas–, mientras permiten el intercambio de humedad entre ésta y la atmósfera de humedad relativa controlada en la que se coloca la celda (deseccador con disolución de ácido sulfúrico). El desecador se introduce a su vez en una estufa con temperatura regulada. Se mantiene la

misma succión hasta que el peso de las muestras se estabiliza –lo que indica que se ha completado la transferencia de agua–, para lo que se requiere un tiempo comprendido entre dos y tres meses. Una vez alcanzado el equilibrio se pasa al siguiente escalón de succión, cambiando la disolución del desecador. La determinación se realiza según el procedimiento descrito en la sección “Curva de retención en celdas indeformables”.

Como sucede en el caso de los edómetros, las celdas sólo impiden la variación de volumen de la muestra cuando se produce hinchamiento, es decir, en las trayectorias de humectación, pero no cuando hay retracción. Con este método, la restricción de deformación impuesta a la muestra durante la hidratación es total y, por tanto, no existe un intervalo de densidades para una misma curva, como ocurre cuando se utilizan los edómetros con succión controlada. Sin embargo, estas celdas no permiten la medida de la presión de hinchamiento que se realiza en los edómetros.

Se han determinado dos curvas, siguiendo una trayectoria de humectación desde succión 150 hasta 2 MPa. Una de las curvas corresponde a muestras con densidad seca de 1,65 g/cm³, y la otra con densidad seca de 1,70 g/cm³. La determinación de cada una de las curvas se ha realizado sobre tres muestras de las mismas características iniciales, cada una de ellas en su propia celda. La altura de las pastillas es de 1,20 cm, y su sección de 3,80 cm². La presión aplicada para compactarlas ha sido de entre 19 y 35 MPa.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla XXXVII.

Tabla XXXVII: Resultados de la curva de retención a 40 °C en trayectoria de humectación a volumen constante (media de 3 determinaciones)

Densidad seca: 1,65 g/cm ³			Densidad seca: 1,70 g/cm ³		
Succión (MPa)	w (%)	S _r [*]	Succión (MPa)	w (%)	S _r [*]
149,4	13,6	0,58	151,3	13,9	0,64
71,0	16,8	0,71	58,1	17,9	0,82
31,6	20,2	0,86	32,2	20,4	0,94
12,0	22,9	0,97	12,3	22,8	1,05
3,2	24,9	1,06	5,2	24,1	1,11
2,3	26,1	1,11	2,3	25,6	1,17

^{*}Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Las muestras de densidad seca $1,70 \text{ g/cm}^3$ alcanzan para todas las succiones grados de saturación más altos que las de densidad seca $1,65 \text{ g/cm}^3$, debido a su menor tamaño medio de poros (Figura 96). Además, las muestras de densidad seca $1,70 \text{ g/cm}^3$ alcanzan la saturación para un valor de succión superior a las de densidad $1,65 \text{ g/cm}^3$. Este valor está entre 30 y 12 MPa para la primera densidad y entre 12 y 3 MPa para la segunda. Por debajo de este valor de succión se registran incluso grados de saturación superiores a la unidad, lo que se debe a que el cálculo se ha realizado considerando la densidad del agua igual a $1,00 \text{ g/cm}^3$ (cf. sección “DENSIDAD DEL AGUA”). Este valor de succión por debajo del cual la muestra está saturada, es del mismo orden que el encontrado para muestras de densidad seca similar a 20°C (ensayo EDS1_11).

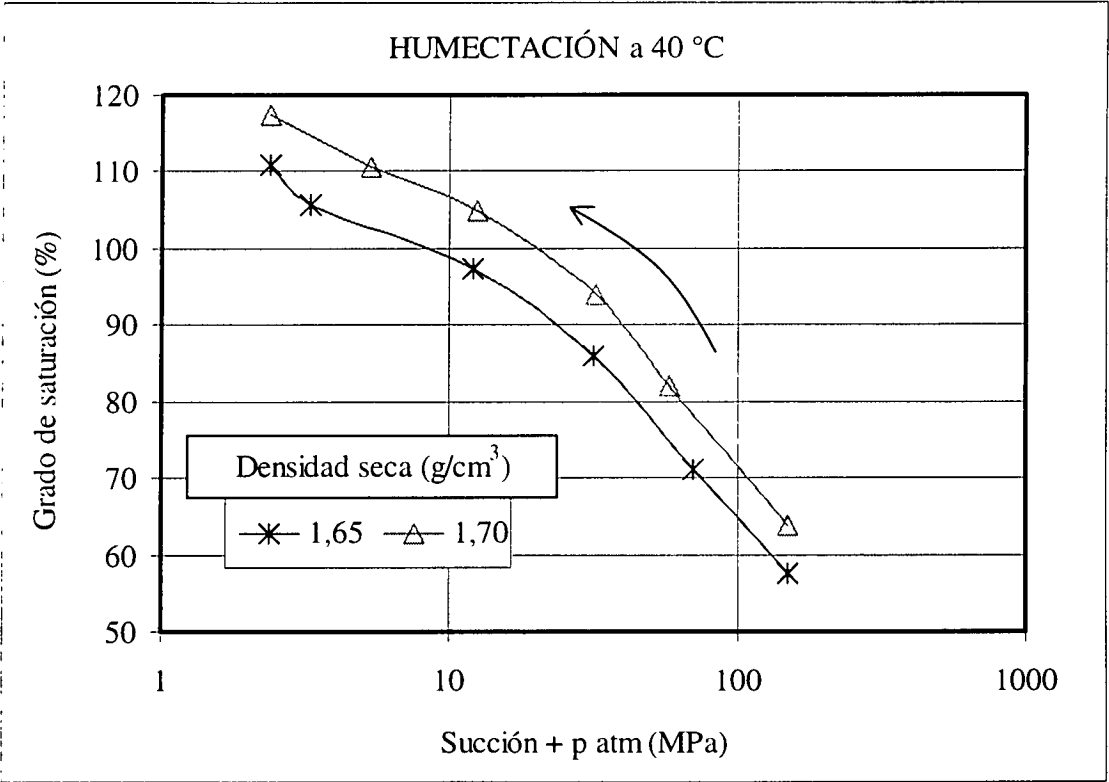


Figura 96: Valores medios del grado de saturación alcanzados en las trayectorias de humectación a volumen constante a 40°C

Los valores de humedad en función de la succión se han representado en la Figura 97, junto con los resultados obtenidos a 20°C en las curvas de retención a volumen constante pertenecientes a los intervalos de densidad seca más próximos a los estudiados a 40°C (ensayos EDS5_6 y EDS1_11). Así mismo, se ha incluido el ajuste obtenido para la

trayectoria de humectación a volumen libre para densidad seca inicial de $1,75 \text{ g/cm}^3$ a 20°C (que permanece en valores de densidad seca menores durante toda la trayectoria). Aunque no hay grandes diferencias entre las curvas de humedad para densidad seca $1,65$ y $1,70 \text{ g/cm}^3$ a 40°C –probablemente porque son densidades muy próximas–, al comienzo de la hidratación, la humedad de las muestras de densidad seca más alta es mayor para una misma succión; pero al llegar a las succiones más bajas, los valores de humedad de las muestras más densas son inferiores. Esto es debido a que el volumen de poros pequeños es mayor en las muestras de mayor densidad seca, porque durante la compactación se reduce el volumen de poros grandes, por lo que la muestra tomará más agua al comienzo de la hidratación. Pero a medida que se reduce la succión y el grado de saturación aumenta, la menor porosidad total de las muestras de mayor densidad hace que su posibilidad de tomar agua sea más limitada.

Las curvas obtenidas a 40°C son muy similares a las obtenidas para el intervalo de densidad seca $1,75$ - $1,69 \text{ g/cm}^3$ a 20°C (ensayo EDS1_11); aunque se registran algunos valores de humedad para una misma succión ligeramente superiores a 40°C que a 20°C .

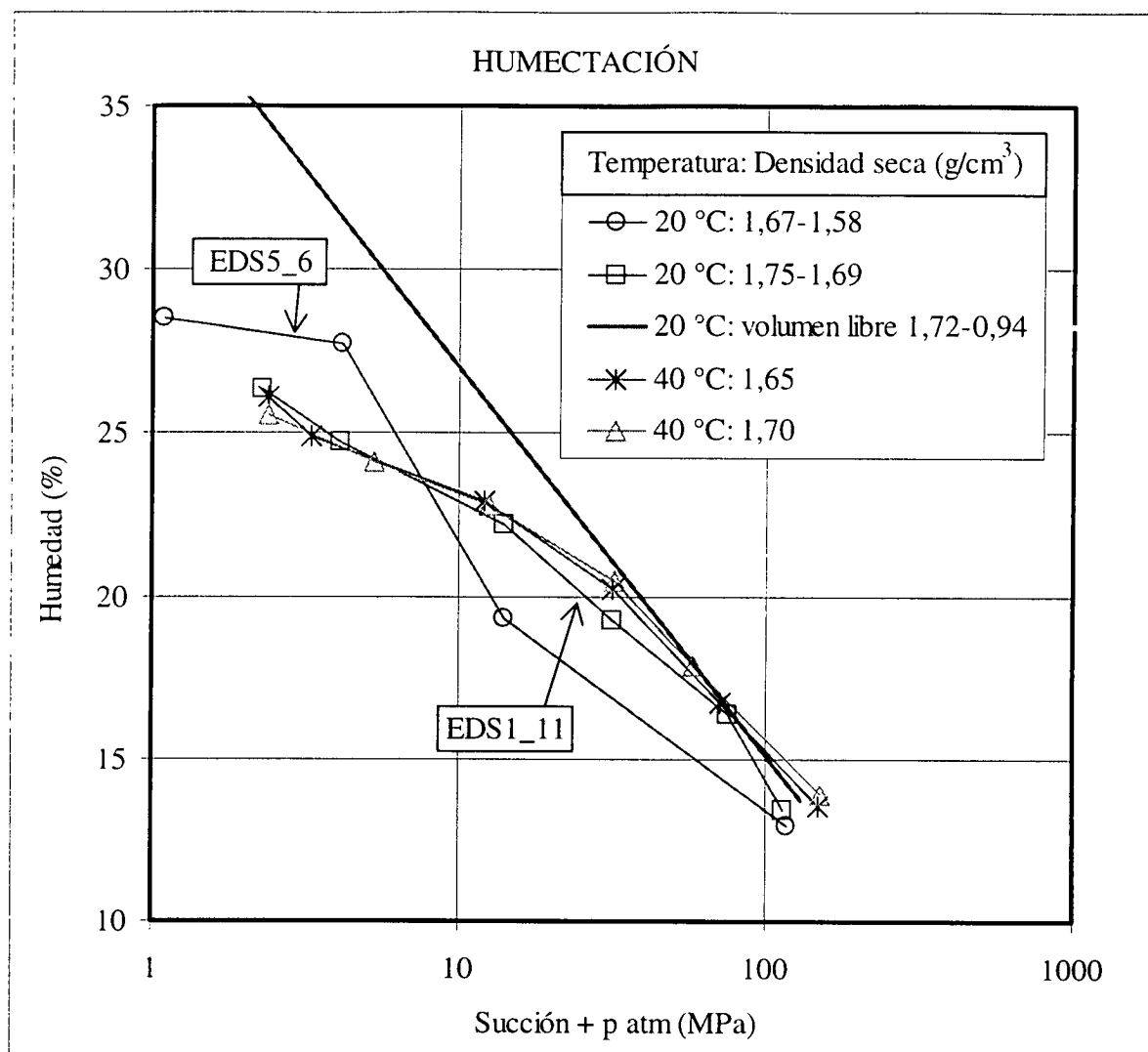


Figura 97: Valores de humedad alcanzados en las trayectorias de humectación a volumen constante y ajuste obtenido a volumen libre para diferentes temperaturas

Por tanto, no ha podido identificarse claramente la influencia de la temperatura en el intervalo 20-40 °C sobre los valores de la curva de retención en términos de humedad, que, en cualquier caso, no parece ser importante. En curvas de retención determinadas a volumen libre en la arcilla de Boom compactada, se ha encontrado que la tendencia de comportamiento es que, para una misma succión, la humedad de la muestra disminuya con la temperatura (Bernier et al. 1997, Romero 1999).

Ajustes a la expresión de van Genuchten

Con los valores experimentales obtenidos en los distintos ensayos de trayectorias comunes, se ha realizado un ajuste tomando una expresión de la ecuación de van Genuchten (1980), que relaciona el grado de saturación efectivo (S_{re}) y la succión (s) mediante la siguiente expresión, correspondiente a la rama de hidratación:

$$S_{re} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{s}{P_w}\right)^{\frac{1}{1-\lambda_w}}\right)^{\lambda_w}}$$

y la equivalente correspondiente a la rama de secado:

$$S_{re} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{s}{P_d}\right)^{\frac{1}{1-\lambda_d}}\right)^{\lambda_d}}$$

donde P_w y λ_w son parámetros del material para la rama de hidratación y P_d y λ_d para la de secado. El grado de saturación efectivo se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$S_{re} = \frac{S_r - S_{r\ res}}{S_{r\ máx} - S_{r\ res}}$$

donde S_r es el grado de saturación, $S_{r\ máx}$ es el grado de saturación máximo y $S_{r\ res}$ es el grado de saturación residual, que indica la cantidad de agua que no es posible extraer sin someter la muestra a un incremento de succión muy elevado.

Para calcular el grado de saturación efectivo se ha tomado un $S_{r\ res}$ de 0,16 ó 0,18, según la densidad seca del ensayo. Éste se ha tomado a la vista de los resultados experimentales de las curvas de retención determinadas a volumen libre, que muestran decrementos de humedad en función de la succión del mismo orden para todo el intervalo de succiones investigado, haciéndose menores sólo para succiones por encima de 400 MPa, para las que se ha medido un grado de saturación próximo a estos valores (Tabla XXV). La utilización de estos datos deducidos de las curvas a volumen libre se justifica porque, para las

succiones altas, ambos métodos –volumen libre y confinado– son equivalentes, puesto que no hay hinchamiento que contrarrestar y los cambios de densidad no son demasiado grandes. El grado de saturación máximo ($S_{r\text{ máx}}$) se considera 1,00, puesto que la muestra, al estar confinada, llega a saturarse completamente en todos los ensayos.

La Tabla XXXVIII refleja los ensayos de los que se han tomado los datos para realizar los diferentes ajustes y los valores obtenidos para cada parámetro según la trayectoria implicada. Los coeficientes de los ajustes están calculados mediante una técnica de ajuste de mínimos cuadrados no lineal. Para realizar los ajustes, todos los puntos en los que el grado de saturación resultó superior a 1,00, por utilizarse para su cálculo la densidad del agua libre, se han llevado a este valor. Para las trayectorias de hidratación tras secado (ensayos EDN4_8 y EDN5_7) no se ha realizado ningún ajuste porque los datos no eran adecuados, ya que la muestra permanece saturada durante toda la trayectoria.

Tabla XXXVIII: Coeficientes de los ajustes según la expresión de van Genuchten entre succión y S_r efectivo en función del tipo de trayectoria, de la densidad seca y de la temperatura

Ensayos	Densidad seca (g/cm ³)	Trayectoria (MPa)	P_w o P_d (MPa)	λ_w o λ_d	S_r máximo	S_r residual	r^2
EDN1_6 EDS5_6	1,60	Humectación 130 a 0	15,94±4,19	0,29±0,03	1,00	0,16	0,962
EDN4_8 EDS5_6	1,60	Secado tras humetación 130 / 0 / 130	66,78±29,42	0,28±0,10	1,00	0,16	0,815
EDS1_11 EDN5_7	1,75	Humectación 130 a 0	80,76±6,37	0,46±0,03	1,00	0,18	0,994
EDN5_7 EDS1_11	1,75	Secado tras humectación 130 / 0 / 476	146,86±4,71	0,65±0,02	1,00	0,18	0,995
40 °C	1,65	Humectación 150 a 2	40,24±3,35	0,34±0,02	1,00	0,17	
40 °C	1,70	Humectación 150 a 2	70,31±8,25	0,39±0,04	1,00	0,18	

La representación gráfica de los valores experimentales y de los ajustes se muestra en la Figura 98, que incluye las curvas a 20 y a 40 °C. Se aprecia, por una parte, que el grado de

saturación efectivo para una misma succión es mayor en las muestras de mayor densidad seca y, por otra, que el efecto de la histéresis es más notable para la densidad más baja. Así mismo, la curva de retención a 20 °C para densidad seca de 1,75 g/cm³ coincide prácticamente con la curva para densidad seca de 1,70 g/cm³ a 40 °C, lo que hace pensar en un aumento de la capacidad de retención al aumentar la temperatura; o bien, en un deficiente control del volumen de la muestra durante la determinación para densidad seca 1,75 g/cm³, que se realizó en edómetros con succión controlada, pudiendo haberse producido disminución de la densidad seca hasta valores próximos a 1,70 g/cm³. La primera hipótesis coincidiría con el hecho de que las humedades para una misma succión a 40 °C son ligeramente superiores que a 20 °C. Esta tendencia es contraria a la que se ha encontrado para otros materiales, en los que la capacidad de retención a volumen libre disminuye con la temperatura (Romero 1999). De nuevo, esta diferencia puede ser consecuencia del método de determinación, porque el comportamiento de la muestra puede ser distinto en función de su posibilidad de variar de volumen.

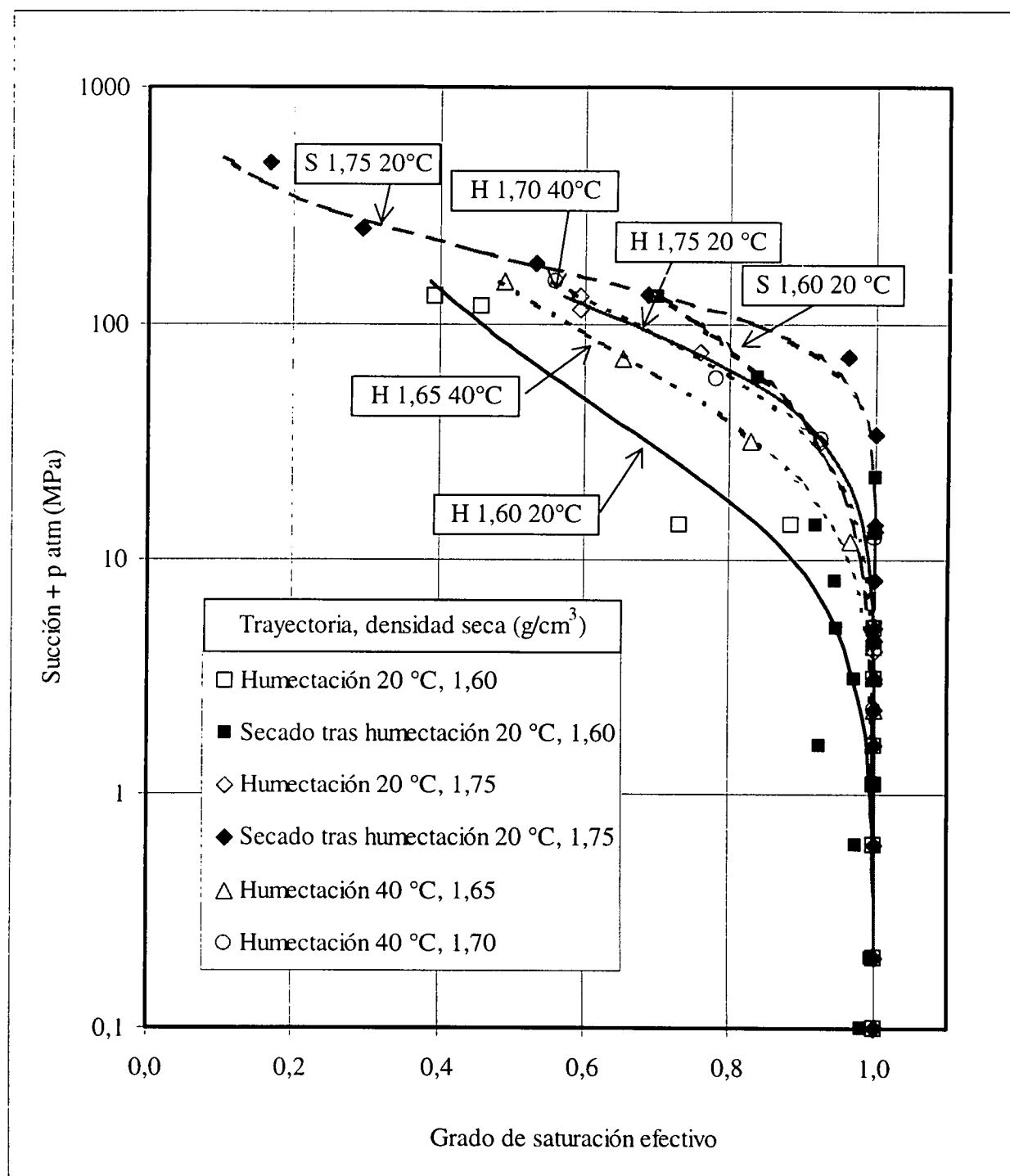


Figura 98: Valores experimentales de la curva de retención para diferentes densidades (en g/cm³), temperaturas y trayectorias, y ajustes según la expresión de van Genuchten

Conclusiones

De todo lo expuesto en las secciones previas se pueden extraer las siguientes conclusiones referidas a las curvas de retención:

- La contribución de la succión osmótica al valor total de succión es despreciable, por lo que la succión de esta bentonita es fundamentalmente de tipo matricial.
- La relación entre succión y humedad de esta bentonita no depende del método de fabricación de la muestra, tallado o compactación.
- En las curvas determinadas a volumen libre, la porosidad de la bentonita varía al hacerlo la succión, disminuyendo la densidad seca al aumentar la humedad, y viceversa. En estas curvas, la relación entre succión y humedad es logarítmica en cualquier tipo de trayectoria, mientras que la relación entre succión y densidad seca se ajusta mejor a una ecuación de tipo potencial.
- Para las trayectorias a volumen libre se ha apreciado cierta influencia de la trayectoria y del valor de densidad seca inicial en las curvas de retención, de manera que se han obtenido ecuaciones que relacionan succión con humedad y succión con densidad seca, en función de la densidad seca inicial, para las trayectorias de humectación, secado y humectación tras secado. Las muestras con mayor densidad seca inicial alcanzan mayores humedades para una misma succión, lo que se atribuye al mayor número de poros pequeños y, por tanto, susceptibles de ser afectados por un determinado valor de succión durante la hidratación.
- Las humedades alcanzadas para una succión dada son algo menores si se ha producido secado previo, aunque esta diferencia de humedad entre las trayectorias de humectación y de humectación tras secado tiende a hacerse menor a medida que la succión disminuye, llegándose incluso, a partir de cierto valor de succión, a obtener humedades mayores en muestras previamente secadas.
- En las trayectorias a volumen libre, al producirse un cambio constante de la porosidad de la muestra durante la humectación, el aumento en el grado de saturación que

ocasionaría el aumento de humedad, queda contrarrestado por la disminución de densidad seca, por lo que hay un intervalo de succión para el que la variación de succión no modifica el grado de saturación. Este intervalo de succión queda comprendido aproximadamente entre 0,5 y 100 MPa, siendo el valor inferior el punto de salida de aire de la macroporosidad, y el valor superior el punto de salida de aire de la microestructura en trayectorias de humectación. Por otra parte, en las curvas de retención a volumen libre, el grado de saturación máximo es de entre el 60 y el 80 %, dependiendo de la densidad seca inicial.

- Por el contrario, en las curvas de retención a volumen constante, la humedad alcanzada para una misma succión es mayor cuanto menor es la densidad seca inicial, pero el grado de saturación para una misma succión es siempre superior en las muestras de densidad seca más elevada. Para todas las densidades secas ensayadas, las muestras se saturan completamente por debajo de determinado valor de succión, que es menor cuanto menor es la densidad seca de la muestra.
- En las trayectorias de secado tras humectación a volumen constante, la humedad alcanzada durante el secado es mayor que la que se obtuvo para la misma succión durante la humectación previa.
- En las trayectorias a volumen libre la humedad alcanzada para una misma succión es mayor que en las de volumen constante, aumentando la diferencia entre ambas a medida que disminuye la succión. El valor de succión a partir del cual la diferencia entre ambas trayectorias se hace más acusada es más alto para las densidades más altas; y está comprendido aproximadamente entre 30 y 8 MPa. Por encima de estos valores la relación succión/humedad estaría controlada por la microestructura y sería independiente de la densidad seca (succión intra-agregado), mientras que por debajo estaría controlada por la macroestructura (succión inter-agregado).
- Aunque la diferencia de las curvas obtenidas a volumen constante a 20 y 40 °C es muy pequeña, parece existir una mayor capacidad de retención a mayor temperatura.

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

La caracterización mecánica del material se ha abordado sólo desde el punto de vista de los cambios de volumen bajo diferentes condiciones de saturación y carga, pero sin incluir el estudio de la resistencia.

Presión de hinchamiento

Para este estudio se ha determinado la presión de hinchamiento de muestras de diferente densidad seca compactadas directamente en el anillo del edómetro y saturadas con agua destilada. Se ha comprobado también la influencia del tipo de agua utilizada para saturar la muestra, realizando ensayos con agua granítica o salina (cf. sección “AGUA UTILIZADA”). Así mismo, con el objeto de comprobar la anisotropía de esta propiedad, se ha realizado el ensayo sobre pastillas talladas en dos direcciones a partir de bloques de mayor tamaño, colocadas en el edómetro en sentido paralelo y perpendicular al de compactación de los bloques. En todos los casos se ha utilizado la arcilla con su humedad higroscópica y con la granulometría con que salió de fábrica (tamaño de grano máximo 5 mm). La sección de las pastillas ha sido de 19,63, 11,40 ó 9,98 cm² y la altura de 1,20 cm.

Variación en función del índice de poros

La presión de hinchamiento se ha determinado en pastillas compactadas uniaxialmente en el interior del anillo del edómetro hasta diferentes densidades. La muestra se satura con agua destilada desde la piedra porosa inferior y se añaden cargas para evitar su deformación. En ocasiones, y especialmente para las densidades secas por encima de 1,60 g/cm³, la capacidad de carga de los equipos no permite contrarrestar completamente la deformación de la pastilla, por lo que el valor final que se obtiene de presión de hinchamiento no corresponde a la densidad seca nominal (inicial), sino a la densidad seca final, que es menor. Por este motivo, en la Tabla XXXIX, además de la presión de hinchamiento obtenida en cada ensayo, se presentan los valores iniciales y finales de densidad seca y humedad, así como el grado de saturación final. Se observará que los grados de saturación obtenidos superan el 100 %, sobre todo para las densidades secas más

altas. Como se discutió en la sección “DENSIDAD DEL AGUA”, estos valores del grado de saturación son consecuencia de la utilización de la densidad del agua libre para su cálculo, lo que, especialmente para las densidades secas más altas, no debe de ser correcto. La mayor dificultad experimental para determinar los valores de presión de hinchamiento muy altos –dada la limitación de los equipos, que no están diseñados para aplicar cargas tan elevadas– se traduce en una mayor dispersión de los valores obtenidos para densidades secas superiores a 1,65 g/cm³.

Tabla XXXIX: Presión de hinchamiento de pastillas compactadas a diferentes densidades secas saturadas con agua destilada

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	P _s (MPa)	w final (%)	Duración (días)	S _r [*] final (%)
1,29	1,26	15,0	0,5	48,6	3	116
1,29	1,28	14,9	0,3	49,9	3	121
1,34	1,34	13,2	0,8	40,3	3	107
1,35	1,35	12,5	0,5	40,8	3	110
1,36	1,35	14,0	1,0	39,7	3	106
1,37	1,36	12,6	1,4	38,4	3	105
1,41	1,40	14,5	2,0	34,8	4	102
1,45	1,43	13,0	1,5	36,9	6	111
1,47	1,45	11,7	1,6	35,9	2	113
1,48	1,45	11,6	2,9	33,2	6	104
1,50	1,49	14,1	3,4	33,5	3	112
1,52	1,50	12,5	3,6	32,7	3	111
1,54	1,51	12,0	3,3	33,6	3	115
1,54	1,53	13,1	4,3	32,0	3	113
1,57	1,53	13,9	5,2	29,6	3	104
1,58	1,54	16,3	5,0	29,4	5	105
1,58	1,55	14,8	4,2	32,4	4	118
1,58	1,52	13,4	6,0	30,1	2	104
1,59	1,56	15,6	6,2	27,5	4	101
1,59	1,54	12,3	5,2	29,2	4	104
1,59	1,55	13,0	4,1	32,5	4	119

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	P _s (MPa)	w final (%)	Duración (días)	S _r * final (%)
1,59	1,56	13,8	3,6	29,9	3	111
1,59	1,54	14,0	5,6	29,7	4	107
1,60	1,54	12,9	4,9	30,5	7	110
1,60	1,56	14,1	5,6	28,5	4	105
1,60	1,57	12,5	5,2	28,4	3	107
1,60	1,56	14,2	3,4	31,9	3	118
1,61	1,57	13,5	6,8	28,3	5	107
1,62	1,59	12,9	3,2	29,9	5	116
1,62	1,59	13,0	5,4	31,0	7	119
1,62	1,55	13,0	5,6	30,2	7	110
1,63	1,57	12,7	4,8	27,5	3	103
1,64	1,61	12,0	5,2	26,7	3	107
1,66	1,63	14,2	13,6	26,1	4	107
1,67	1,63	12,0	9,9	26,9	6	111
1,68	1,65	12,5	8,9	26,7	5	114
1,69	1,67	11,6	9,2	28,0	7	122
1,69	1,67	16,6	8,4		3	
1,71	1,70	11,7	7,8	28,4	3	131
1,71	1,69	14,4	8,3	28,4	2	127
1,72	1,70	14,3	10,9	28,6	2	131
1,72	1,71	12,7	11,2	27,8	2	129
1,72	1,70	11,6	9,8	27,5	3	126
1,72	1,70	12,1	10,0	28,2	2	130
1,74	1,71	12,7	8,6	29,0	2	136
1,74	1,72	12,8	12,5	27,2	1	128
1,74	1,73	12,8	7,6	28,2	2	135
1,75	1,71	13,7	13,9	25,9	5	121
1,77	1,70	12,2	16,2	24,1	5	111
1,80	1,77	13,0	9,7	26,5	7	136
1,84	1,76	11,7	16,7	25,5	7	129
1,88	1,73	11,7	16,1	25,2	7	122

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Todos los valores obtenidos se representan en la Figura 99. Con los 52 puntos determinados se puede obtener un ajuste exponencial entre la presión de hinchamiento (P_s , en MPa) y la densidad seca (ρ_d , en g/cm³):

$$\ln P_s = 6,77 \rho_d - 9,07 \quad (r^2 = 0,88)$$

La diferencia entre los valores experimentales y este ajuste es en promedio del 25 %, según se muestra también en la figura. Esta dispersión, mayor para las densidades secas elevadas, es debida tanto a la variabilidad natural de la bentonita como al método de medida –que no permite una gran precisión–, a lo que se une que los equipos se han utilizado en ocasiones al límite de su capacidad, permitiéndose cierta deformación en la muestra, a la que el valor de la presión de hinchamiento es muy sensible, ya que la dependencia de la trayectoria seguida para determinar la presión de hinchamiento sobre el valor final obtenido ha sido señalada y demostrada repetidas veces (Gens & Alonso 1992).

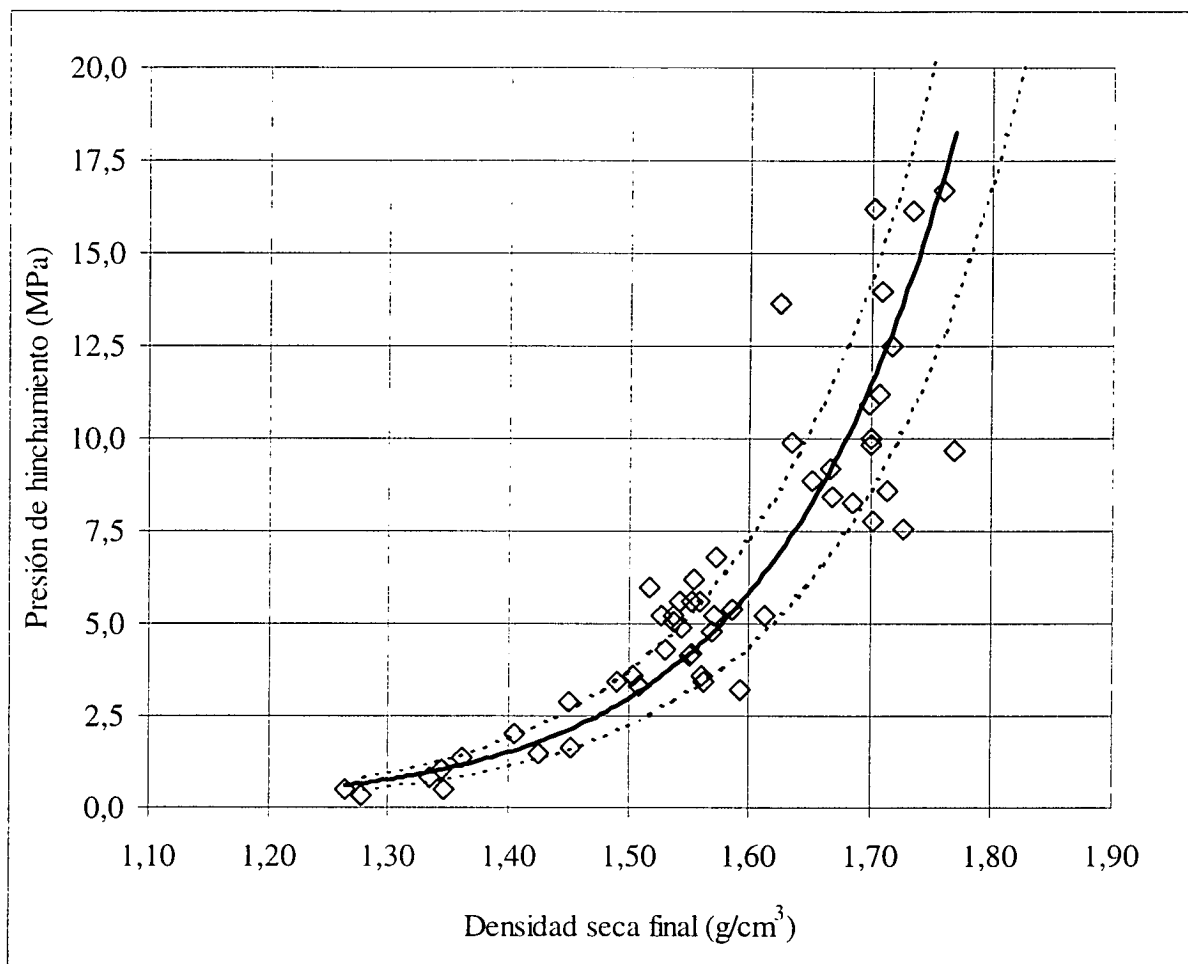


Figura 99: Valores de presión de hinchamiento en función de la densidad seca al final del ensayo obtenidos para saturación con agua destilada, y ajuste exponencial

Variación en función del tipo de agua

Se ha realizado la determinación de la presión de hinchamiento según se ha descrito en la sección anterior sobre pastillas fabricadas a partir de la arcilla con su humedad higroscópica compactada a varias densidades, pero utilizando agua granítica para saturar la muestra. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla XL, en la que se incluyen también los valores teóricos de presión de hinchamiento para muestras de la misma densidad seca final saturadas con agua destilada, según el ajuste mostrado en la sección anterior, y la desviación respecto a este valor teórico, siendo positivos los valores de desviación cuando la presión de hinchamiento obtenida es mayor que la teórica.

Tabla XL: Presión de hinchamiento de pastillas compactadas saturadas con agua granítica y valores teóricos para la misma densidad con agua destilada

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	Duración (días)	P _s (MPa)	P _s teórica (MPa)	Desviación (%)
1,43	1,41	14,5	36,6	6	1,5	1,6	-8
1,49	1,48	14,8	33,6	6	2,8	2,5	12
1,60	1,58	13,9	28,3	7	7,1	5,0	42
1,72	1,68	13,3	28,0	6	9,2	10,0	-8

Teniendo en cuenta la dispersión de datos que se obtiene para este parámetro, debida a la técnica de medida, se puede concluir que los valores obtenidos con agua granítica no difieren mucho de los que se habrían obtenido para las mismas densidades con agua destilada, según el ajuste que se muestra en la sección anterior (Figura 100). Aunque se acepta generalmente que la presión de hinchamiento disminuye con el contenido salino de la disolución, para la montmorillonita compactada a alta densidad la influencia de la salinidad del agua en el valor de la presión de hinchamiento es inapreciable, especialmente en el caso de la montmorillonita cálcica (Pusch 1994).

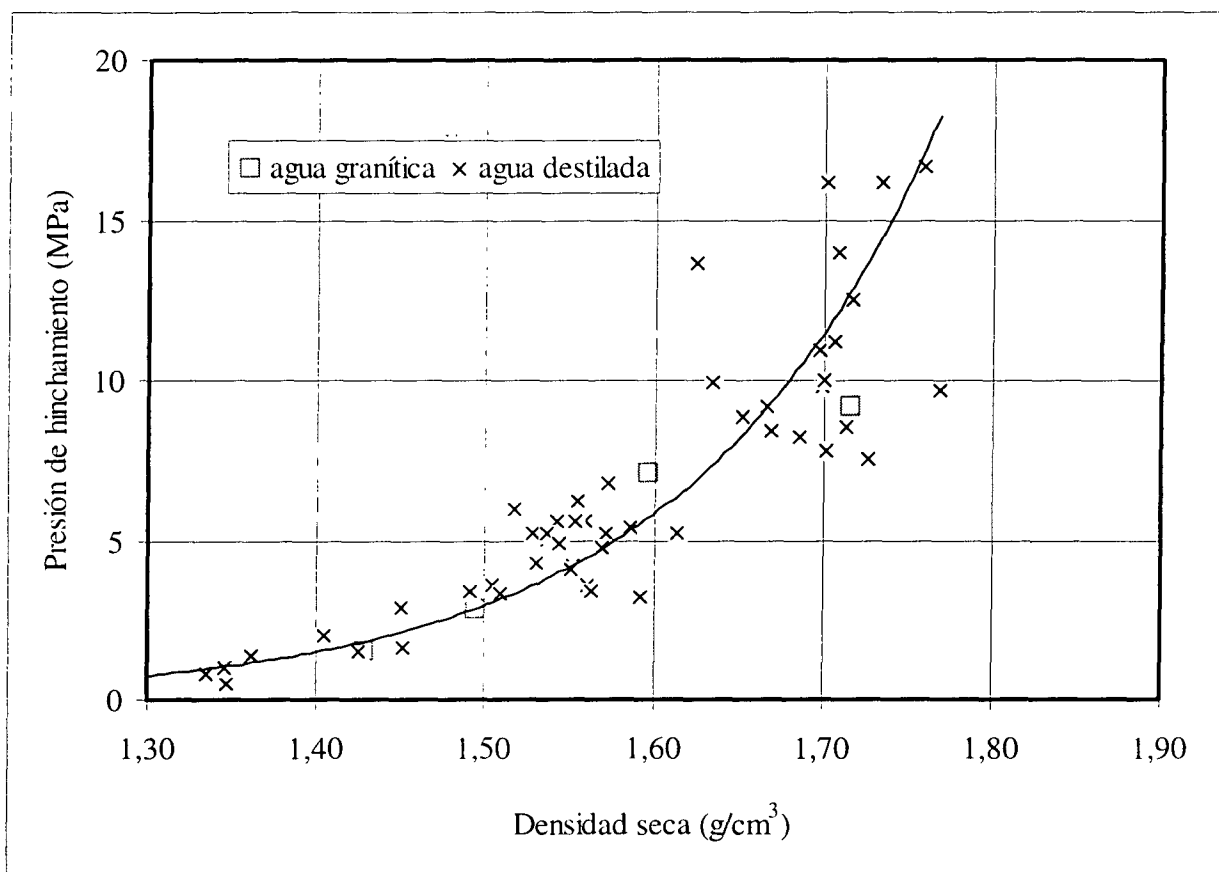


Figura 100: Presión de hinchamiento obtenida para la arcilla saturada con agua destilada y granítica

Variación en función del sentido de la medida

La determinación de la presión de hinchamiento descrita en las secciones previas, se realiza siempre en pastillas compactadas directamente en el anillo del edómetro y cargadas en sentido paralelo al esfuerzo de compactación. Con el fin de comprobar la influencia de la dirección de la medida en el valor de la presión de hinchamiento, se han realizado varias determinaciones utilizando probetas obtenidas mediante tallado de algunos bloques de los fabricados para el ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX (*cf.* sección “El Proyecto FEBEX” y Figura 68). El tallado se ha realizado con un anillo cortador de las dimensiones apropiadas en dos direcciones diferentes: paralela al esfuerzo de compactación del bloque, es decir, vertical según se coloca éste en su posición de fabricación, y perpendicular al esfuerzo de compactación, o sea, en dirección horizontal. El primer tipo es el que corresponde a la dirección normal de realización del ensayo. Una vez obtenida la pastilla,

cuya sección nominal es 9,76 cm² y altura 1,20 cm, se mide y pesa y se introduce en el anillo del edómetro. Se satura con agua destilada desde la piedra porosa inferior, manteniéndose el volumen constante mediante adición de las cargas apropiadas. Como el ajuste entre la pastilla tallada y las paredes de la celda no es perfecto, durante la saturación se produce hinchamiento lateral, y por lo tanto cierta disminución de la densidad, que se puede calcular porque las dimensiones del anillo portamuestras son fijas y conocidas. Este hinchamiento lateral puede afectar al valor final de la presión de hinchamiento, por lo que los valores obtenidos en muestras compactadas directamente en el anillo del edómetro y en muestras talladas, pueden no ser estrictamente comparables.

En las Tabla XLI y Tabla XLII se muestran los resultados obtenidos en función de la dirección de la determinación, junto con los valores que se habrían obtenido en muestras de la misma densidad seca final directamente compactadas en el anillo del edómetro y ensayadas en la dirección de compactación (ajuste de la sección “Variación en función del índice de poros”). Se incluye también el porcentaje de desviación del valor obtenido respecto al teórico, significando el signo positivo que el valor obtenido es más alto que el teórico y viceversa. El valor de densidad seca inicial reflejado en las tablas está obtenido a partir de las dimensiones de la pastilla antes de introducirla en el anillo del edómetro, mientras que el final está calculado a partir de su altura final, considerando que la muestra rellena al saturarse los huecos entre la pared del anillo y las piedras porosas, como efectivamente sucede.

Tabla XLI: Valores de presión de hinchamiento obtenidos en muestra tallada en sentido perpendicular al esfuerzo de compactación

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	Duración (días)	P _s (MPa)	P _s teórica (MPa)	Desviación (%)
1,52	1,44	13,4	36,0	3	1,9	1,8	4
1,64	1,60	14,1	31,0	3	6,1	5,5	11
1,65	1,60	13,7	30,8	3	5,8	5,6	5
1,64	1,63	14,7	30,0	4	6,1	6,7	-8
1,67	1,65	13,5	28,5	4	9,0	7,3	18
1,68	1,65	13,5	28,9	4	8,6	7,2	25
1,66	1,66	13,8	29,5	4	7,0	7,5	-6

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	Duración (días)	P_s (MPa)	P_s teórica (MPa)	Desviación (%)
1,69	1,67	15,8	28,6	2	8,5	8,3	2

Tabla XLII: Valores de presión de hinchamiento obtenidos en muestra tallada en sentido paralelo al esfuerzo de compactación

ρ_d inicial (g/cm ³)	ρ_d final (g/cm ³)	w inicial (%)	w final (%)	Duración (días)	P_s (MPa)	P_s teórica (MPa)	Desviación (%)
1,50	1,48	16,0	36,0	13	2,0	2,5	-20
1,56	1,52	14,4	32,7	3	5,3	3,3	26
1,56	1,51	15,2	31,4	3	4,1	3,2	65
1,65	1,60	16,1	29,4	6	8,3	5,9	42
1,65	1,61	15,7	29,6	6	8,3	6,4	30
1,79	1,72	13,5	28,6	2	10,0	13,5	-26
1,82	1,74	12,3	27,2	2	11,4	14,6	-22

La Figura 101 muestra los valores obtenidos en ambas direcciones junto con el ajuste teórico obtenido para muestras compactadas. Como ya se ha explicado, los valores obtenidos en muestras compactadas y talladas no son exactamente comparables, pero en este caso se ha utilizado la comparación con el valor teórico mostrado en la Tabla XLI y Tabla XLII para tener un valor de referencia con el que determinar diferencias entre la presión de hinchamiento medida en una u otra dirección. De hecho, los valores medidos en muestra tallada son en general superiores a los obtenidos para muestras compactadas. La pastilla tallada antes de introducida en el anillo tiene una densidad seca inicial superior a la que tiene una vez saturada. Esta densidad seca inicial es la responsable de la presión ejercida en un principio verticalmente, que es la que se ha de contrarrestar en el edómetro y, por lo tanto, la que da el valor de la presión de hinchamiento. Este puede ser el motivo de las diferencias observadas entre pastillas talladas y compactadas. Si se considera la densidad seca inicial de la pastilla tallada, en lugar de la que resulta al rellenarse la holgura lateral, las presiones de hinchamiento de pastillas talladas son inferiores a las de pastillas compactadas de la misma densidad, lo que hace suponer que en realidad la densidad que condiciona la presión de hinchamiento es un valor intermedio entre el inicial y el final.

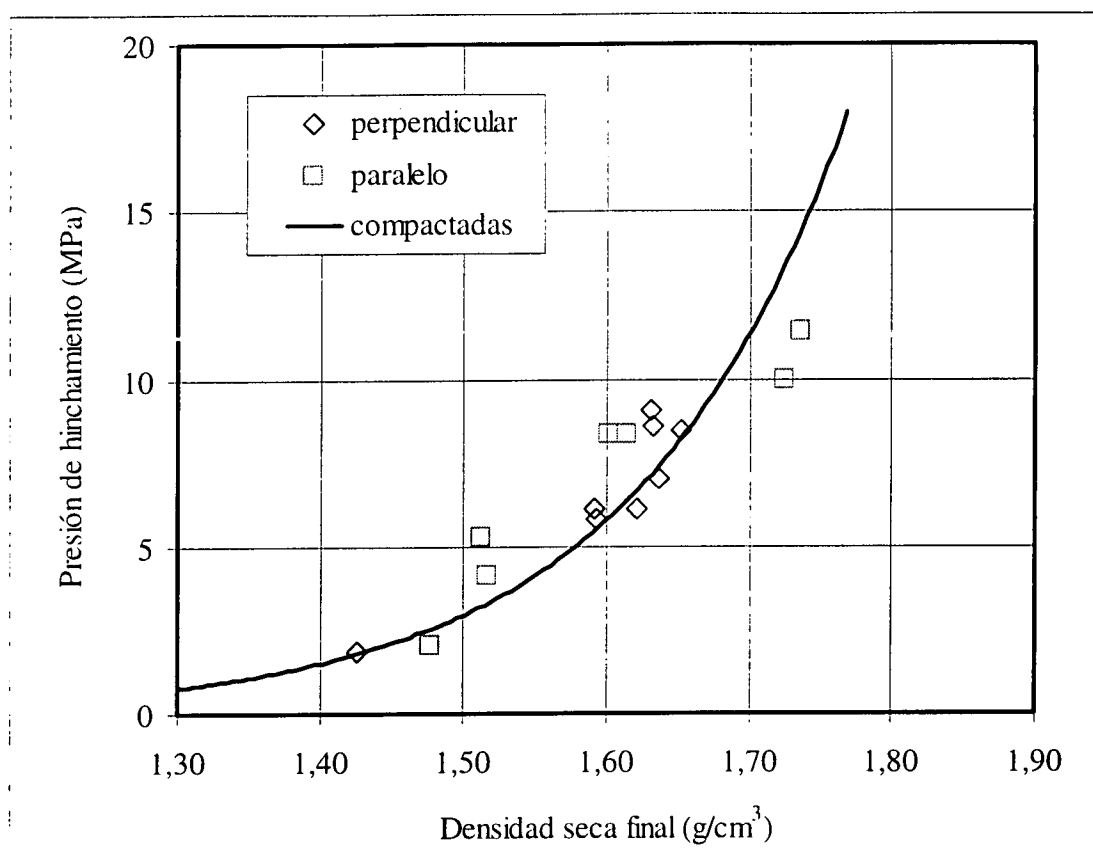


Figura 101: Presión de hinchamiento obtenida en pastillas talladas en dirección perpendicular y paralela al esfuerzo de compactación, junto con el ajuste obtenido para muestras compactadas

Por otra parte, los valores obtenidos en muestras talladas en la dirección paralela al esfuerzo de compactación son en promedio un 14 % superiores a los teóricos para muestra compactada, mientras que los obtenidos en muestras talladas en sentido perpendicular al esfuerzo de compactación son un 6 % superiores. Esta diferencia no se considera significativa, ya que la dispersión de valores que se obtiene con el método de determinación de presión de hinchamiento en edómetro es grande, y la mayor parte de los valores obtenidos en muestra tallada entrarían dentro de la dispersión observada con pastillas compactadas. En cualquier caso, de esperarse alguna variación, ésta debería ser precisamente en el sentido que se ha observado, es decir, que las muestras ensayadas en el sentido paralelo al de la compactación hincharan más. Esto porque, si se produjera alguna reorganización del material durante la compactación, sería la disposición de las partículas laminares en sentido perpendicular al de máximo esfuerzo, lo que ocasionaría un mayor hinchamiento en el sentido paralelo al de compactación, es decir, en la dirección del eje c

de las partículas minerales. Como ya se indicó, esta reorganización parece poco probable, por producirse la compactación de forma muy rápida y con el material en seco.

Hinchamiento bajo carga

Mediante el ensayo de saturación (o hinchamiento) bajo carga se determina la capacidad de deformación del suelo cuando éste se satura sometido a una presión previamente establecida. El ensayo se realiza en el equipo edométrico según se describe en la sección “ENSAYOS EN EDÓMETRO”, y con más detalle en el Anexo III. La muestra se compacta directamente en un anillo portamuestras que impide su deformación lateral, confinada entre dos piedras porosas en la parte inferior y superior. Se aplica a la muestra la carga deseada y se inunda la celda, de manera que se produzca su saturación a través de la placa porosa inferior. La relación entre el incremento de altura final experimentado por la muestra en equilibrio con la carga aplicada, y su altura inicial, da el valor de la deformación experimentada por el material al saturarse bajo la carga a la que se realizó el ensayo.

Puesto que el comportamiento mecánico de la arcilla puede verse fuertemente influido por las interacciones físico-químicas entre las partículas arcillosas y el fluido de los poros, se ha realizado el ensayo, además de con agua destilada –utilizada siempre como patrón–, con un agua salina y un agua granítica de composición similar a la que encontrará la barrera de bentonita en el almacenamiento, descritas en la sección “AGUA UTILIZADA”.

Se han hecho ensayos sobre la arcilla compactada con su humedad higroscópica a densidad seca de $1,60 \text{ g/cm}^3$ y saturada con agua destilada. Además, se han realizado tres series de ensayos de saturación bajo carga con agua granítica, utilizando pastillas compactadas a densidad seca de $1,50$, $1,60$ y $1,70 \text{ g/cm}^3$; y se han realizado también tres series utilizando agua salina, con pastillas compactadas a las mismas densidades secas. En todos los casos las pastillas se han obtenido por compactación uniaxial de la arcilla con su humedad higroscópica directamente en el anillo del edómetro. La sección de la pastilla es de $11,40$ ó $9,98 \text{ cm}^2$, y la altura inicial de $1,20 \text{ cm}$. La duración de los ensayos ha sido superior a 7 días. En la Tabla XLIII se resumen las características y resultados de los ensayos

realizados con agua destilada, en la Tabla XLIV de los ensayos realizados con agua granítica, y en la Tabla XLV de los ensayos realizados con agua salina.

Tabla XLIII: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga con agua destilada

Presión (MPa)	ρ_d inicial (g/cm ³)	w inicial (%)	Deformación (%)	Duración (días)	w final (%)	ρ_d final (g/cm ³)
5,2	1,62	12,8	-17,2	15	39,1	1,39
5,0	1,62	13,0	-17,8	14	38,3	1,37
5,0	1,62	13,3	-12,1	14	38,4	1,44
5,0	1,60	14,6	-17,2	21	40,1	1,37
5,0	1,62	13,2	-17,8	15	39,3	1,37
9,0	1,59	15,0	-13,4	20	37,2	1,40
9,0	1,61	13,7	-14,7	19	36,6	1,40
9,0	1,61	14,2	-15,8	20	36,7	1,39

Tabla XLIV: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga con agua granítica

Presión (MPa)	ρ_d inicial (g/cm ³)	w inicial (%)	Deformación (%)	Duración (días)	w final (%)	ρ_d final (g/cm ³)
0,1	1,72	14,0	-28,6	7	35,1	1,34
0,5	1,72	13,9	-20,6	7	32,5	1,43
1,0	1,72	13,1	-18,3	21	32,1	1,46
3,0	1,72	13,0	-10,6	13	28,8	1,55
0,1	1,62	13,1	-25,1	7	41,0	1,29
0,1	1,61	13,1	-24,5	15	38,7	1,29
0,5	1,62	13,4	-14,3	7	38,3	1,41
0,5	1,54	18,4	-13,7	9	39,5	1,35
1,0	1,61	13,6	-10,6	7	36,6	1,46
1,0	1,61	13,0	-8,8	16	34,0	1,48
2,0	1,60	13,7	-3,3	9	32,2	1,54
2,0	1,62	12,5	-6,4	11	29,5	1,52
3,0	1,60	13,3	-1,5	8	30,5	1,57
3,0	1,60	13,3	-1,2	7	30,0	1,58

Presión (MPa)	ρ_d inicial (g/cm ³)	w inicial (%)	Deformación (%)	Duración (días)	w final (%)	ρ_d final (g/cm ³)
0,1	1,52	12,7	-22,9	10	46,3	1,23
0,5	1,51	13,5	-12,1	10	40,4	1,34
1,0	1,50	14,2	-8,5	13	34,2	1,38
3,0	1,49	15,0	-1,5	13	32,0	1,46

Tabla XLV: Resultados de los ensayos de hinchamiento bajo carga con agua salina

Presión (MPa)	ρ_d inicial (g/cm ³)	w inicial (%)	Deformación (%)	Duración (días)	w final (%)	ρ_d final (g/cm ³)
0,1	1,71	13,0	-28,9	9	43,8	1,33
0,1	1,70	13,4	-33,1	14	43,7	1,28
0,5	1,72	12,7	-18,4	11	35,2	1,45
0,5	1,69	14,2	-23,0	14	39,3	1,38
1,0	1,70	14,1	-18,2	10	36,6	1,44
1,0	1,71	13,0	-16,3	17	31,9	1,47
3,0	1,68	15,0	-9,7	10	31,9	1,53
3,0	1,71	13,0	-9,5	17	28,5	1,56
0,1	1,60	13,6	-25,9	15	43,2	1,27
0,1	1,58	15,4	-25,8	11	36,8	1,25
0,5	1,61	12,9	-16,2	15	33,6	1,39
0,5	1,63	11,6	-15,7	8	40,4	1,41
1,0	1,60	13,4	-9,9	8	35,1	1,46
1,0	1,61	13,3	-10,6	9	37,1	1,45
2,0	1,59	14,5	-7,2	10	29,5	1,48
2,0	1,60	14,1	-5,7	7	34,0	1,51
3,0	1,59	14,6	-6,1	8	29,2	1,50
3,0	1,59	14,1	-5,1	8	29,3	1,52
0,1	1,50	13,3	-21,1	14	45,3	1,24
0,6	1,50	13,3	-11,9	13	39,4	1,34
1,0	1,51	13,1	-8,2	13	33,4	1,39
3,0	1,50	13,9	1,6	11	32,4	1,52

En la Figura 102, Figura 103 y Figura 104 se muestra la evolución de la deformación con el tiempo en los ensayos realizados con pastillas de densidad seca inicial nominal de $1,60 \text{ g/cm}^3$ saturadas bajo diferentes cargas con agua destilada, granítica y salina, respectivamente. En las dos últimas figuras se observa cómo el hinchamiento se desarrolla más rápidamente en las muestras sometidas a menor carga, lo que es debido a que éstas pueden expandir más, con lo que se produce mayor aumento del tamaño de los poros y por tanto de la permeabilidad. Esto confirma la influencia del índice de poros sobre el valor de la permeabilidad.

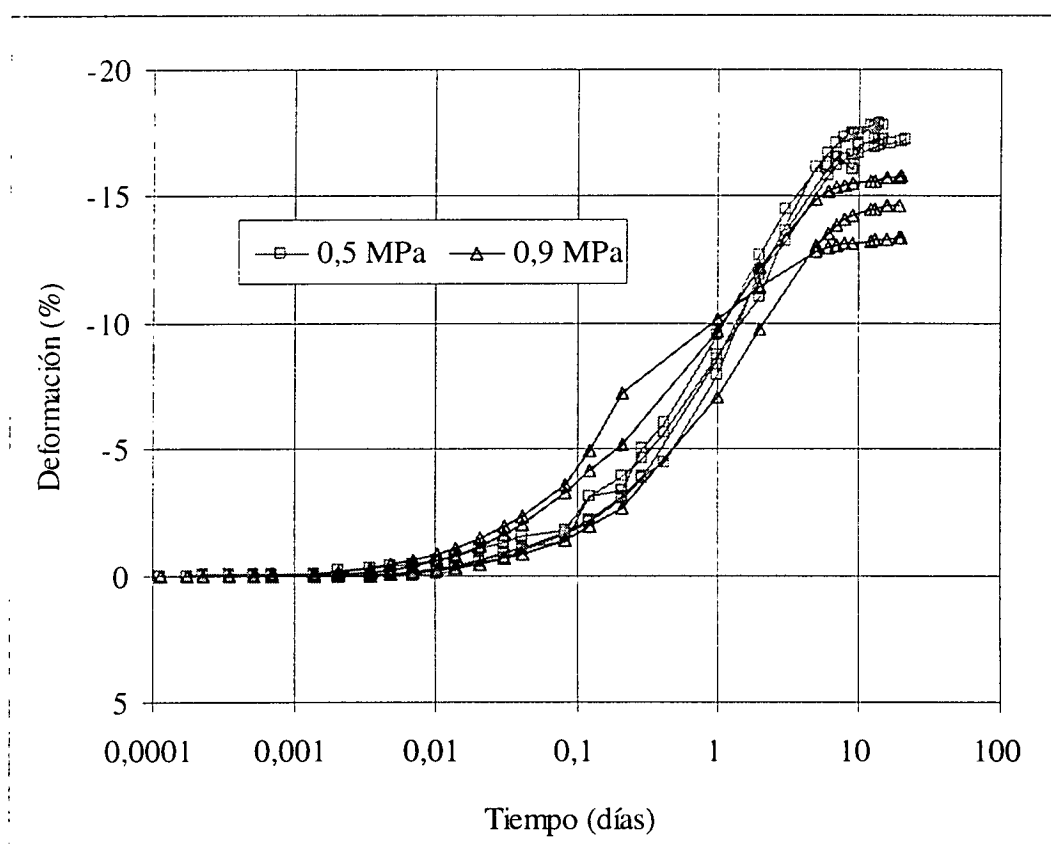


Figura 102: Evolución de la deformación para ensayos de saturación con agua destilada realizados con pastillas de densidad seca inicial nominal de $1,60 \text{ g/cm}^3$ bajo diferentes cargas

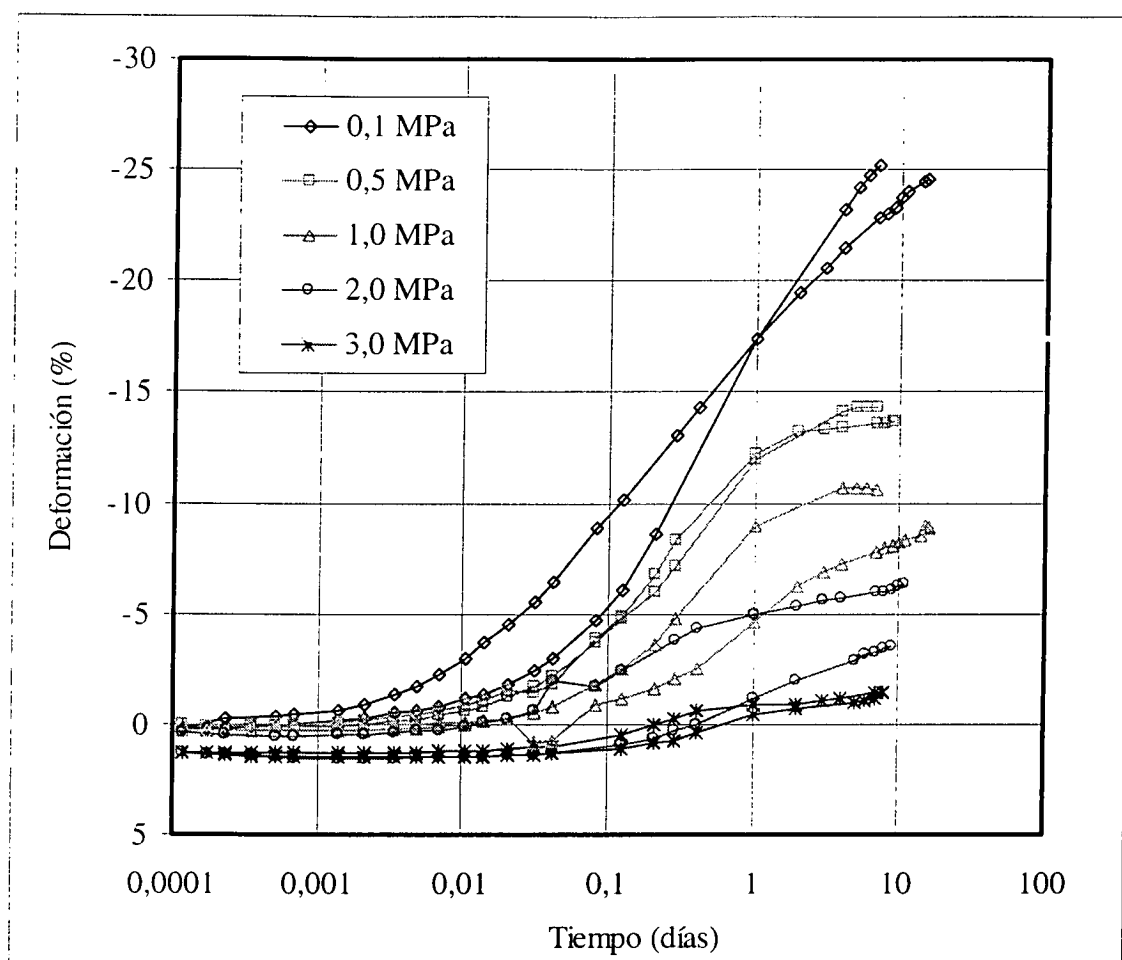


Figura 103: Evolución de la deformación para ensayos de saturación con agua granítica realizados con pastillas de densidad seca inicial nominal de 1,60 g/cm³ bajo diferentes cargas

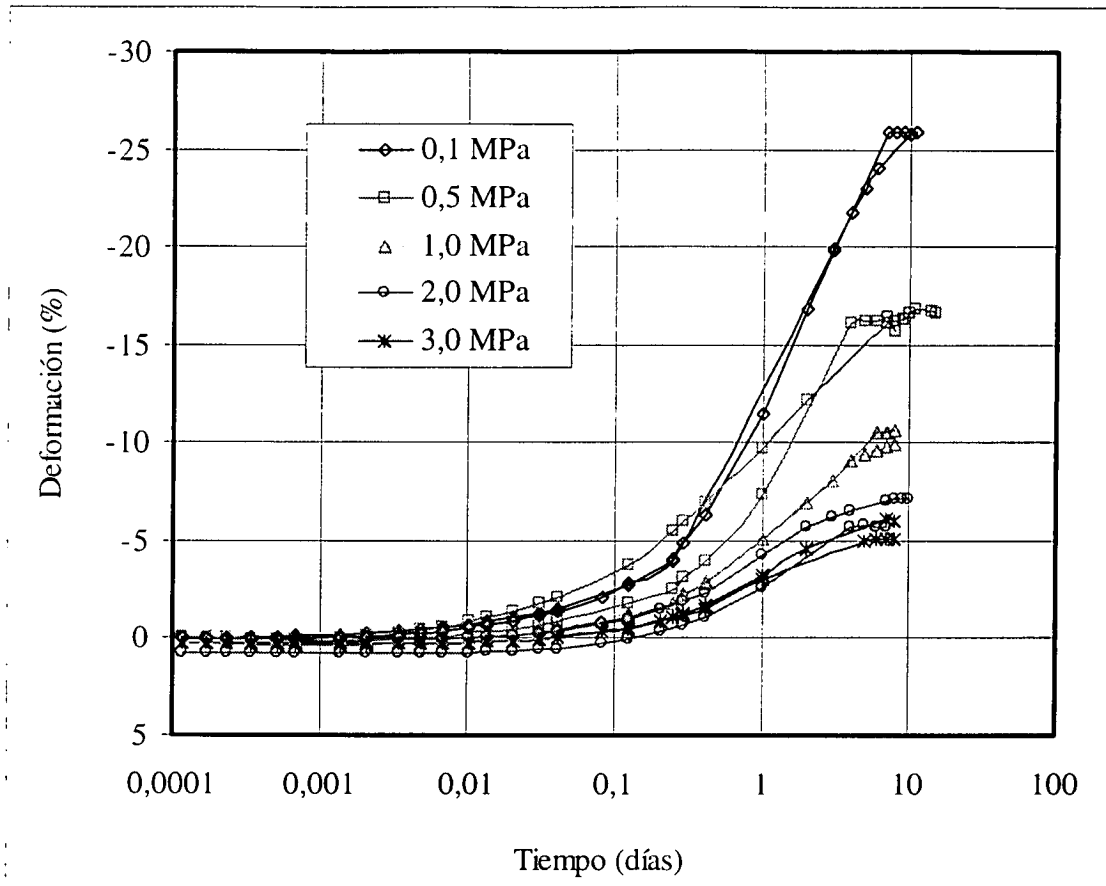


Figura 104: Evolución de la deformación para ensayos de saturación con agua salina realizados con pastillas de densidad seca inicial nominal de 1,60 g/cm³ bajo diferentes cargas

Como era de esperar, las muestras compactadas a densidad seca 1,50 g/cm³ experimentan una deformación tras saturación algo inferior que las muestras compactadas a densidad seca 1,60 g/cm³ saturadas bajo la misma carga, mientras que las muestras compactadas a densidad seca 1,70 g/cm³ sufrieron mayor deformación al saturarse bajo la misma carga, tanto en los ensayos con agua granítica como salina.

En la Figura 105 se muestran los valores finales de deformación en función de la carga aplicada para diferentes densidades secas iniciales, obtenidos en los ensayos de saturación con agua granítica. La relación entre carga vertical (σ , MPa) y deformación (ϵ , %) es de tipo logarítmico, y dependiente de la densidad seca inicial (ρ_d , g/cm³), y se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon = (-6,49 \rho_d + 16,53) \ln \sigma + (-43,59 \rho_d + 58,14)$$

Las rectas incluidas en la Figura 105 corresponden a ajustes obtenidos con esta expresión.

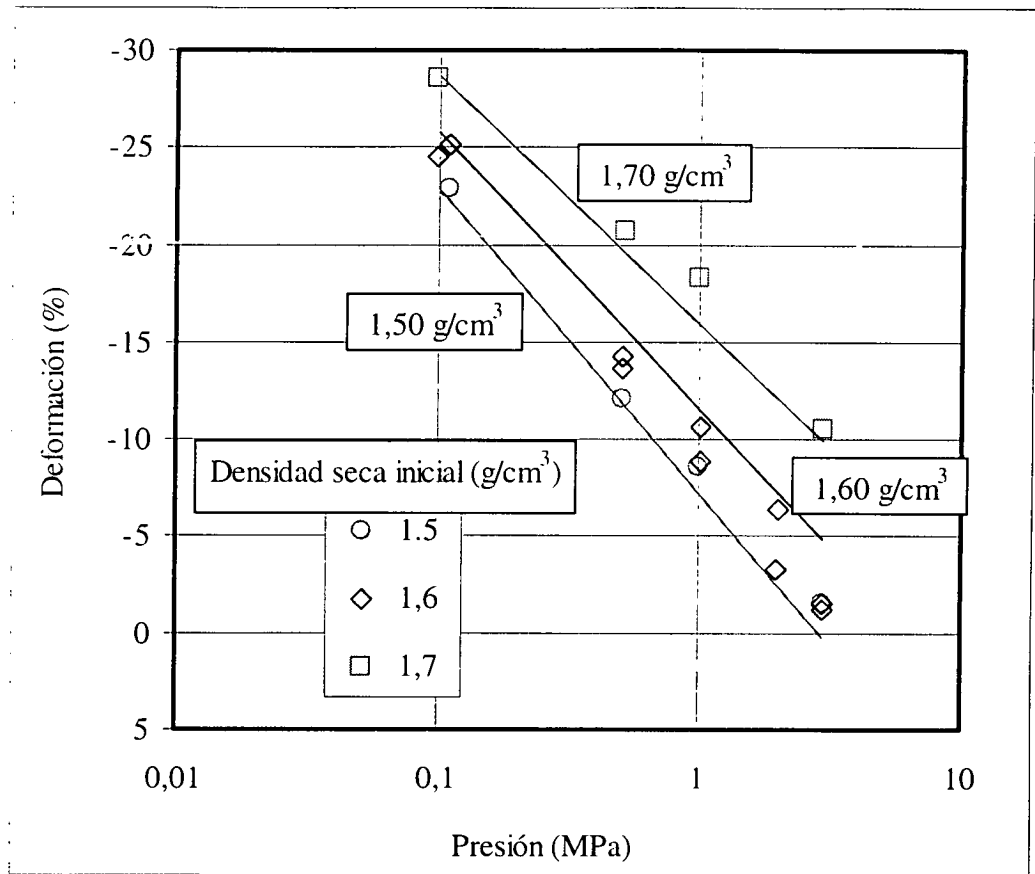


Figura 105: Deformaciones finales alcanzadas por pastillas de diferente densidad seca inicial tras saturación con agua granítica bajo diferentes cargas

La Figura 106 muestra los valores finales de deformación en función de la carga aplicada para tres densidades secas iniciales, obtenidos en los ensayos de saturación con agua salina. De nuevo, la relación entre carga (σ , MPa) y deformación (ϵ , %) es de tipo logarítmico y dependiente de la densidad seca inicial (ρ_d , g/cm³), y se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon = 6,47 \ln \sigma + (-48,71 \rho_d + 66,13)$$

Las rectas incluidas en la Figura 106 corresponden a ajustes obtenidos con esta expresión.

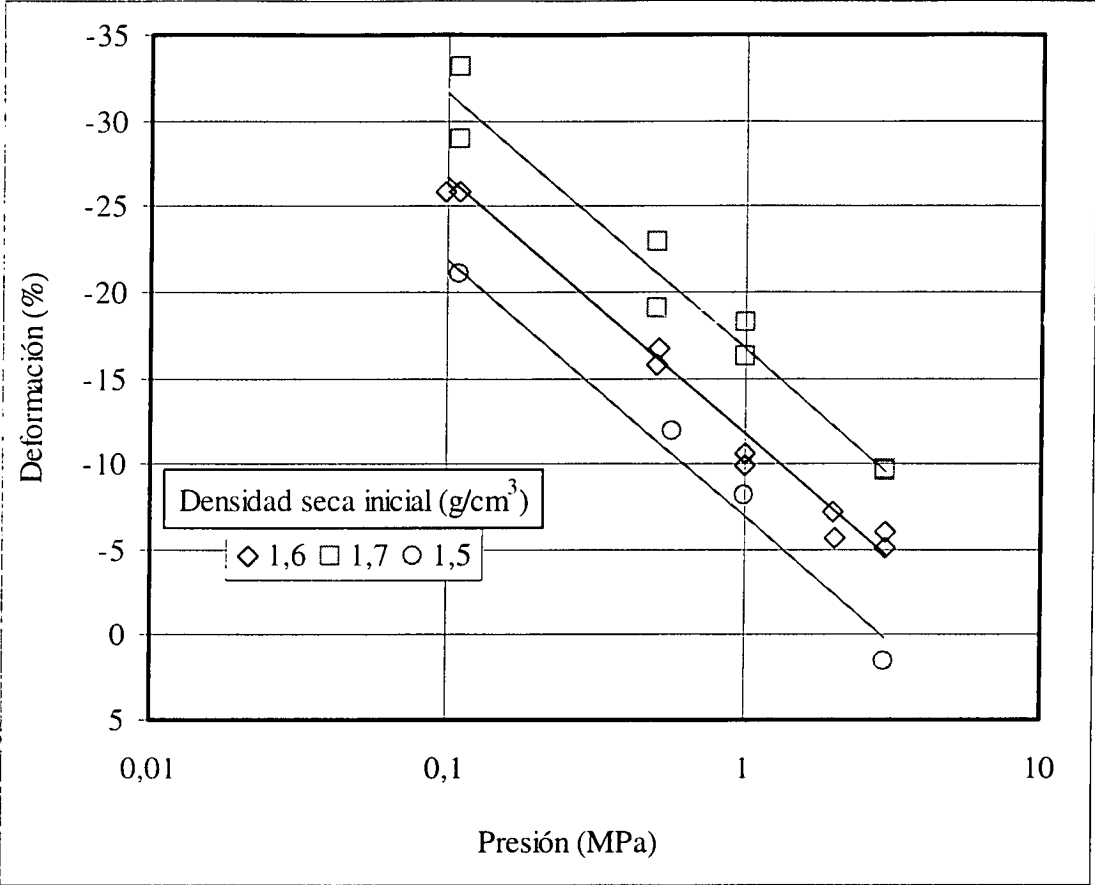


Figura 106: Deformaciones finales alcanzadas por pastillas de diferente densidad seca inicial tras saturación con agua salina bajo diferentes cargas

La Figura 107 muestra las deformaciones finales alcanzadas en todos los ensayos realizados. En esta figura se ha incluido también el valor de la presión de hinchamiento para muestras de densidad seca 1,60 g/cm³ saturadas con agua destilada –calculado según la expresión mostrada en la sección “Presión de hinchamiento”–, que corresponde a la carga necesaria para que la deformación sea nula. Se observa que este valor encaja bien con los resultados obtenidos en los ensayos de saturación bajo carga. Las deformaciones finales no dependen mucho del tipo de agua empleado para saturar, sino de la densidad seca inicial. Sin embargo, entre las muestras de densidad seca inicial 1,60 g/cm³, los valores de deformación obtenidos con agua destilada son los más altos.

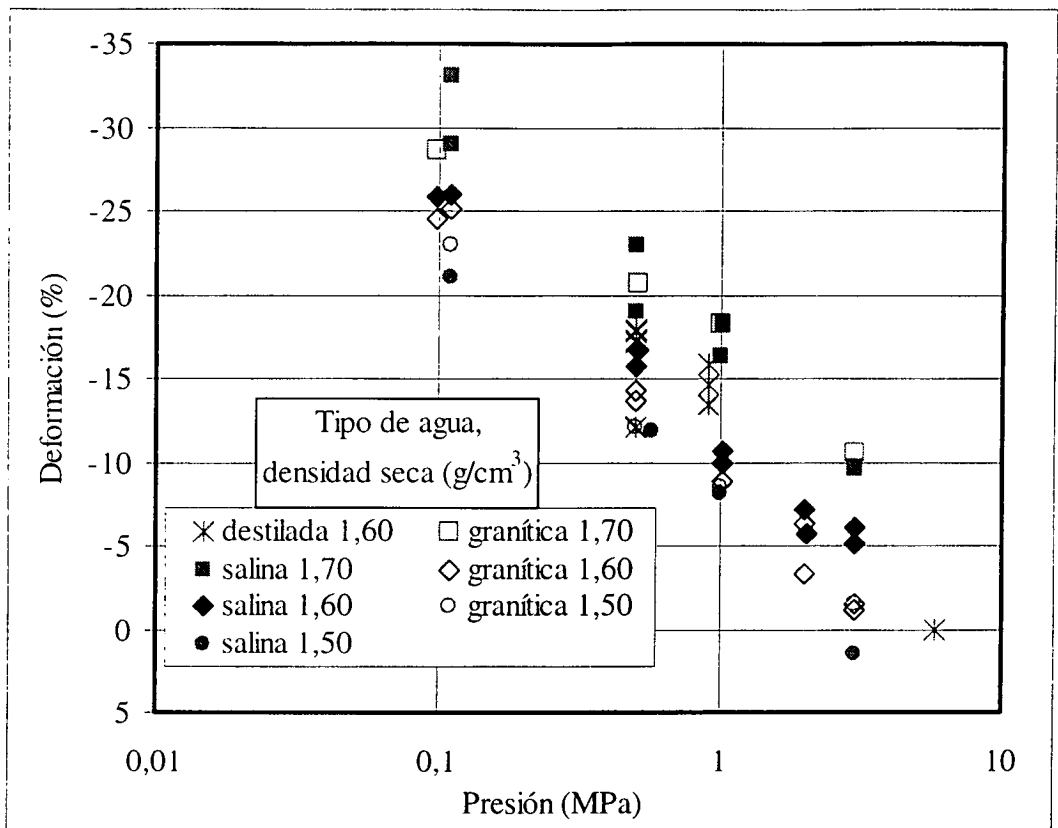


Figura 107: Deformaciones finales alcanzadas por pastillas compactadas a diferentes densidades secas tras saturación bajo diferentes cargas, en función del tipo de agua

En principio, la salinidad de la disolución de saturación reduce la capacidad de hinchamiento de la arcilla, puesto que impide el hinchamiento osmótico y reduce el desarrollo de las dobles capas difusas. En concreto Barbour & Fredlund (1989) distinguen dos mecanismos responsables del cambio de volumen osmótico: la consolidación osmótica, consecuencia directa de la supresión de la doble capa por los cambios en la repulsión entre partículas, y el flujo osmótico, resultado de las diferencias de concentración entre el fluido existente dentro y fuera de la muestra. Ambos mecanismos dependen de la química del fluido intersticial. Studds et al. (1998) encuentran que la capacidad de hinchamiento de la bentonita de Wyoming en polvo saturada con diferentes disoluciones disminuye a medida que aumenta la concentración salina, aunque las diferencias tienden a ser menores a medida que la presión vertical aumenta, desapareciendo la influencia de la molaridad de la disolución en la deformación final para presiones superiores a 0,2 MPa.

Por este motivo, es lógico que las muestras ensayadas con agua destilada sean las que experimenten mayor deformación. El hecho de que no se aprecien grandes diferencias entre los resultados obtenidos en muestras saturadas con agua salina y con agua granítica bajo la misma carga, puede ser debido a que la concentración del agua salina está en equilibrio con las fases minerales de la arcilla, y a que las presiones bajo las que se ha realizado la saturación son elevadas.

Ensayos edométricos con succión controlada

Se recogen a continuación los resultados de 20 ensayos realizados en edómetro con succión controlada. Las trayectorias seguidas se han elegido con el doble objetivo de simular las condiciones de diferentes partes de la barrera de arcilla en el almacenamiento y de obtener parámetros que cuantifiquen su comportamiento. Además, en conjunto todos los ensayos sirven para establecer pautas de comportamiento que pueden ser útiles para comprobar la capacidad de los modelos constitutivos y realizar su calibrado mediante retroanálisis.

La limitación de los ensayos edométricos está en que no permiten conocer completamente el estado de esfuerzos del material –ya que no hay medida del esfuerzo horizontal confinante–, por lo que se introducen dificultades en la interpretación de los resultados y en la comparación con las predicciones de los modelos. En el caso de suelos no saturados, se presenta además la incertidumbre sobre el grado de saturación del suelo, que siempre se desconoce, aunque las curvas de retención obtenidas a volumen constante pueden dar valores de humedad orientativos para cada succión. Sin embargo, las tendencias y rasgos más significativos del comportamiento de los suelos sí pueden seguirse en este tipo de ensayos (Gens & Alonso 1992), cuya realización es técnicamente mucho menos compleja que la de los ensayos triaxiales. Por tanto, el objeto de la realización de esta serie de ensayos ha sido identificar los principales patrones de comportamiento de la bentonita en condiciones similares a las del almacenamiento, cuantificando, en lo posible, las tendencias observadas y contribuyendo al aumento de la limitada base de datos experimentales sobre el comportamiento deformacional de materiales muy expansivos en condiciones de succión elevada.

Se ha seguido el Procedimiento “Ensayo edométrico con succión controlada” (Anexo V), del que se puede encontrar una descripción abreviada en la sección “Ensayos edométricos con succión controlada”. Todos los ensayos se han realizado con pastillas compactadas uniaxialmente directamente en el anillo del edómetro a densidad seca nominal de $1,70 \text{ g/cm}^3$, utilizando la arcilla con su humedad higroscópica. La presión necesaria para alcanzar esta densidad es de 20 MPa. La altura inicial de la pastilla es de 1,20 cm, y la sección de $11,40 \text{ ó } 19,24 \text{ cm}^2$. La sección condiciona la máxima presión vertical aplicable en el edómetro, que es de 10 MPa en el primer caso y de 5 MPa en el segundo. Puesto que todas las pastillas se han compactado utilizando presiones superiores a las que se pueden aplicar en los equipos, al inicio de los ensayos la muestra está sobreconsolidada.

La succión se ha aplicado mediante presión de nitrógeno para valores entre 0,1 y 14 MPa, o mediante disoluciones de ácido sulfúrico para valores entre 30 y 550 MPa.

La temperatura de los ensayos se ha mantenido constante a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Se han seguido trayectorias de hidratación/secado y de carga/descarga, y en cada una de ellas la modificación de la carga vertical o de la succión se realiza de forma escalonada. La mayor parte de las trayectorias son de cambio de succión bajo carga constante o de cambio de carga bajo succión constante. Los ensayos finalizan con una descarga rápida por escalones, en la que cada escalón dura un día, por lo que la deformación no llega a estabilizarse completamente. La descripción detallada de las características y resultados de cada ensayo se encuentra en el Anexo VII. Tanto en las tablas de este anexo como en la discusión que sigue, se ha reflejado sólo el valor de deformación final (índice de poros) de cada escalón, pero hay que tener en cuenta que cada uno de estos valores es un valor de “equilibrio” que se alcanza tras permanecer la muestra en las mismas condiciones de tensión vertical y succión durante un tiempo que suele ser de 20 días. Esto supone que la duración de cada ensayo es en muchas ocasiones superior a un año. Las curvas de deformación en función del tiempo para cada escalón de cada ensayo se encuentran también en el Anexo VII.

Los ensayos se referencian de acuerdo a una clave (EDN*_# ó EDS*_#) que refleja:

- el edómetro concreto en que el ensayo se ha realizado: edómetro de nitrógeno o sulfúrico, y un número del 1 al 5, ya que se dispone de 5 puestos de ensayo de cada tipo (EDN* ó EDS*).

- el número de ensayo realizado en ese equipo (_#).

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos. El índice de poros final de cada escalón se representa en función de la carga vertical o succión correspondiente. En algunos casos ambas variables, por tener las mismas unidades, se han representado en el eje de abscisas, pero utilizando líneas de diferente estilo para las trayectorias de cambio de succión y para las de cambio de carga vertical, según se indica en cada leyenda.

Edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno

Se han realizado 8 ensayos de este tipo, siguiendo 4 trayectorias distintas (E2, E3, E4/1 y E4/2). La máxima succión aplicable en estos edómetros es de 14 MPa, lo que implica que en el primer escalón de todos los ensayos la succión se reduce bruscamente desde el valor inicial de la muestra compactada con su humedad higroscópica, que es de unos 130 MPa, a 14 MPa. Por ello, todas las muestras hinchán y sufren una disminución de densidad durante el primer escalón de los ensayos, más acusada en aquellos ensayos que comienzan bajo una carga pequeña. En estos edómetros la succión se puede disminuir hasta 0 MPa dejando la celda abierta a la atmósfera.

En los ensayos realizados en estos edómetros, como se deduce de las curvas de retención, la muestra permanece siempre próxima a la saturación y, en cualquier caso, con humedad muy superior a la higroscópica. Por tanto, reproducen las condiciones de la bentonita en las zonas más próximas a la parte externa de la barrera, donde la saturación se producirá muy rápidamente, sin ninguna desecación previa. Los ensayos de hidratación bajo carga pequeña simulan situaciones del borde de la barrera, donde el hueco entre ésta y la roca permite su hinchamiento (trayectoria E3). Las trayectorias de carga reproducen la compresión que el material sufre debido a las presiones de hinchamiento desarrolladas.

Las trayectorias concretas seguidas en los ensayos realizados en edómetros con control de la succión mediante presión de nitrógeno se representan en la Figura 108 y Figura 109, en las que las condiciones iniciales están indicadas con un círculo.

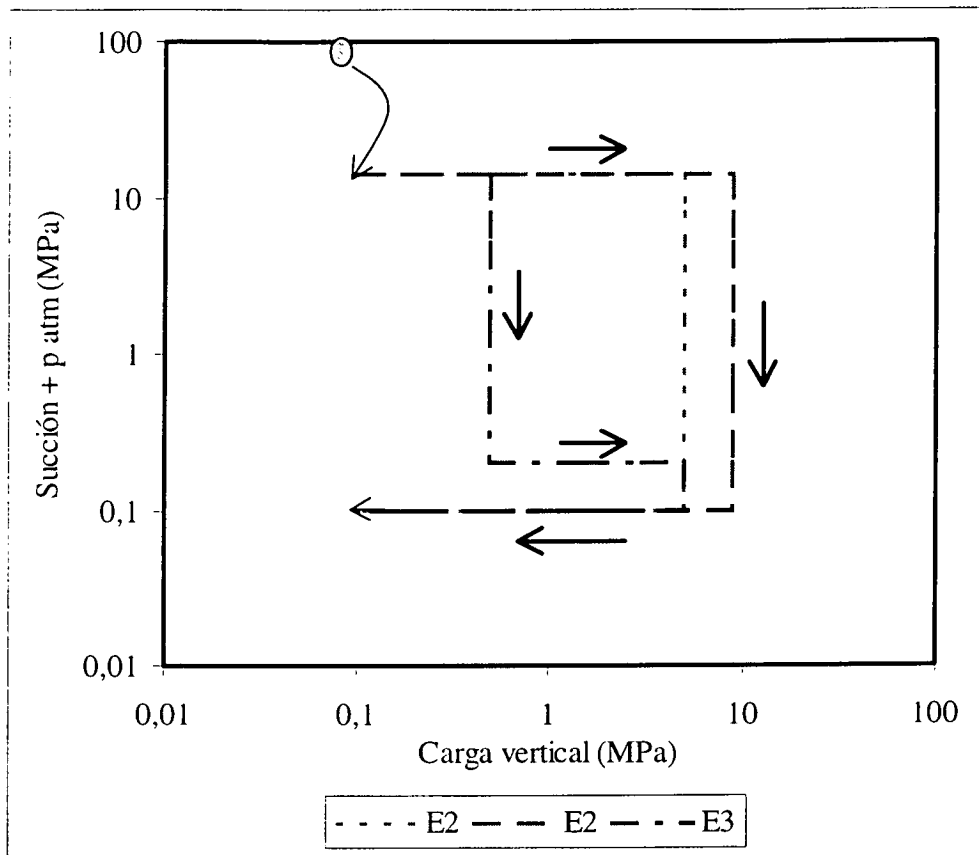


Figura 108: Trayectorias seguidas en los ensayos edométricos con control de succión mediante presión de nitrógeno de tipo E2 y E3

En las trayectorias E4/1 y E4/2 la muestra se hidrata bajo una carga constante elevada, diferente para cada una de ellas. En un principio se intentó mantener la deformación igual a 0 y determinar la presión de hinchamiento de la muestra, pero esto no se consiguió, debido a las limitaciones de carga de los equipos y a las elevadas presiones de hinchamiento de las muestras.

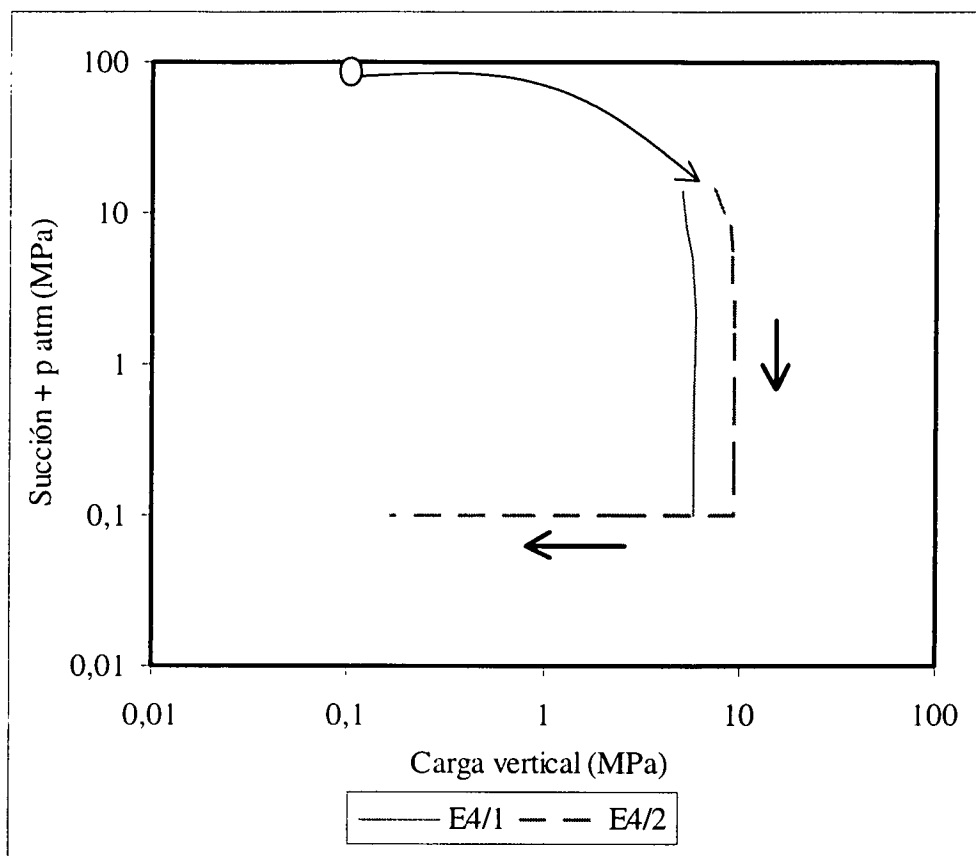


Figura 109: Trayectorias seguidas en los ensayos edométricos con control de succión mediante presión de nitrógeno de tipo E4

Trayectoria E2

Los ensayos que siguen esta trayectoria comienzan con la carga progresiva de la muestra bajo succión 14 MPa. En los ensayos EDN1_5 y EDN3_10 la carga se produce en varios escalones, mientras que en el ensayo EDN5_6 el proceso de carga es más rápido. Concluido el proceso de carga, se reduce la succión aplicada, manteniendo el máximo valor de presión vertical alcanzado. La trayectoria completa se esquematiza en la Figura 110.

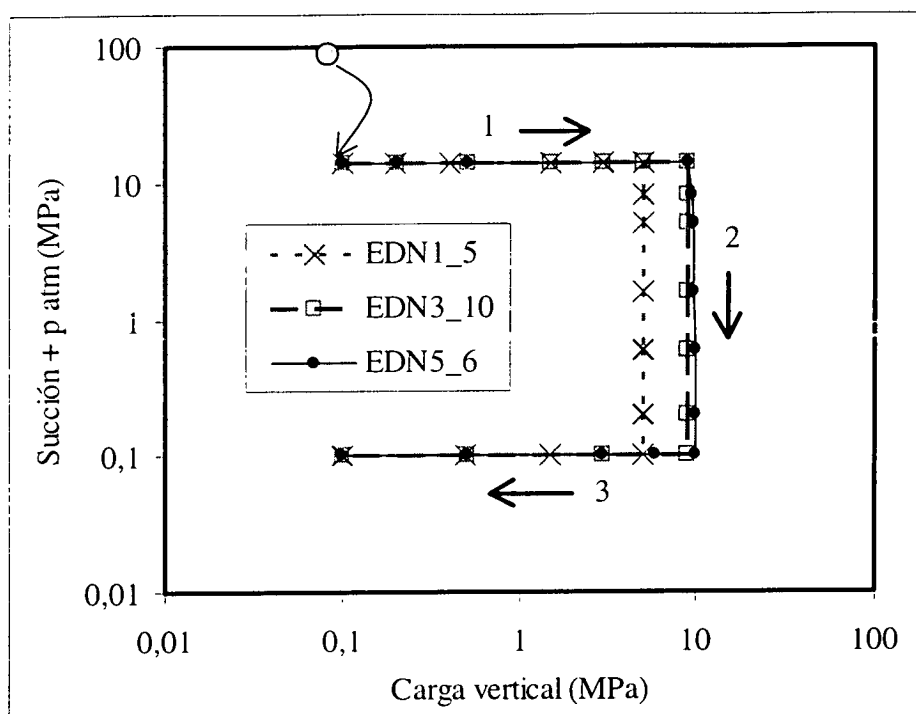


Figura 110: Trayectoria E2 seguida en edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno

Las muestras de los ensayos EDN1_5 y EDN5_6 tenían una densidad seca inicial de $1,72 \text{ g/cm}^3$ ($e=0,57$), y la del ensayo EDN3_10 de $1,69 \text{ g/cm}^3$ ($e=0,60$). Durante el primer escalón se produce una disminución de estas densidades hasta valores de $1,50$, $1,55$, y $1,55 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. La Figura 111 muestra la evolución de la deformación en función del tiempo durante los escalones sucesivos del tramo de carga bajo succión 14 MPa (tramo 1) para el ensayo EDN1_5. Esta gráfica permite comprobar la importancia de la deformación experimentada por la muestra durante el escalón inicial, al pasar la succión de 130 a 14 MPa , de tal magnitud (14%) que no llega a contrarrestarse durante la carga posterior.

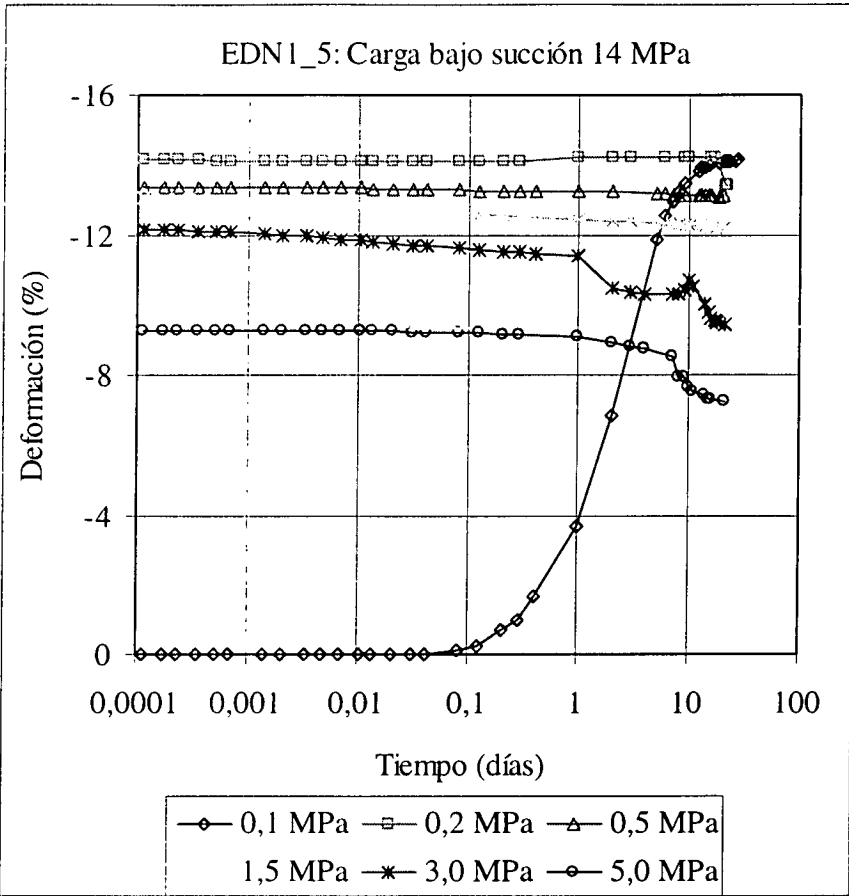


Figura 111: Evolución de la deformación durante los diferentes escalones del tramo de carga bajo succión 14 MPa en el ensayo EDN1_5 (trayectoria E2, tramo 1). El escalón de carga 0,1 MPa incluye la deformación por hinchamiento al pasar de una succión de 130 a 14 MPa

Las trayectorias concretas seguidas en estos tres ensayos son: manteniendo la máxima succión posible en el equipo (14 MPa) se produce la carga de la muestra por escalones hasta el máximo valor posible (5 MPa en EDN1_5 y 9 MPa en EDN5_6 y EDN3_10, Figura 112). A continuación se reduce la succión por escalones hasta valor 0, manteniendo la misma carga vertical, lo que produce un aumento del índice de poros según se muestra en la Figura 113. Este aumento de índice de poros es pequeño, debido a que las cargas verticales aplicadas son altas y a que el grado de saturación no varía mucho en el intervalo de succión de 14 a 0 MPa, siendo muy alto en todo él, según se puso de manifiesto al determinar las curvas de retención a volumen constante. Finalmente se realiza una descarga por escalones en la que el índice de poros aumenta al disminuir la carga según una relación logarítmica (Figura 114).

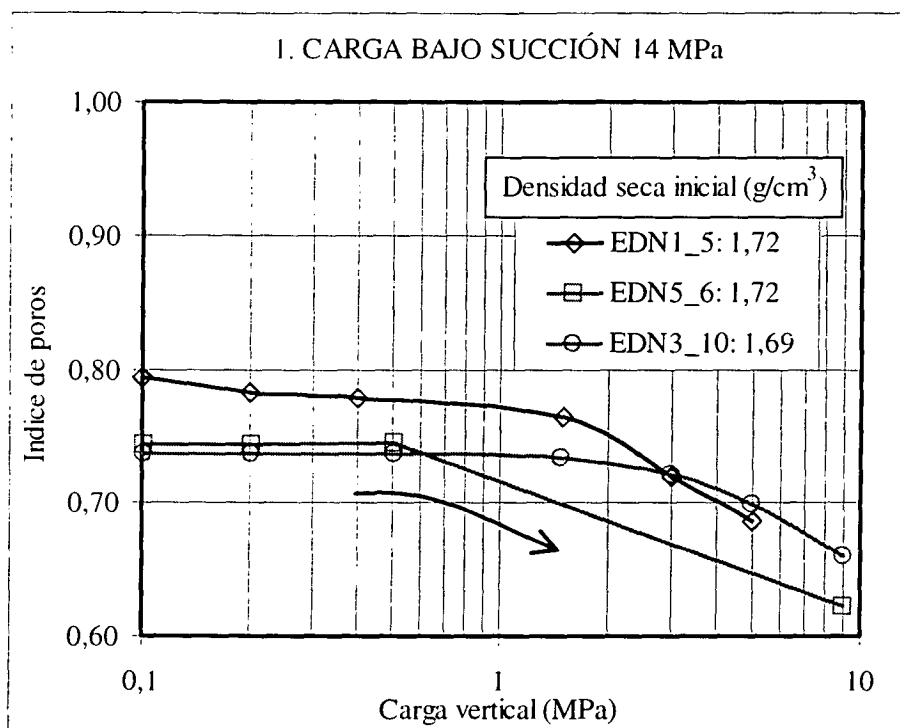


Figura 112: Evolución del índice de poros en tres ensayos al seguir una trayectoria de carga bajo succión de 14 MPa (e inicial 0,57-0,60) (trayectoria E2, tramo 1)

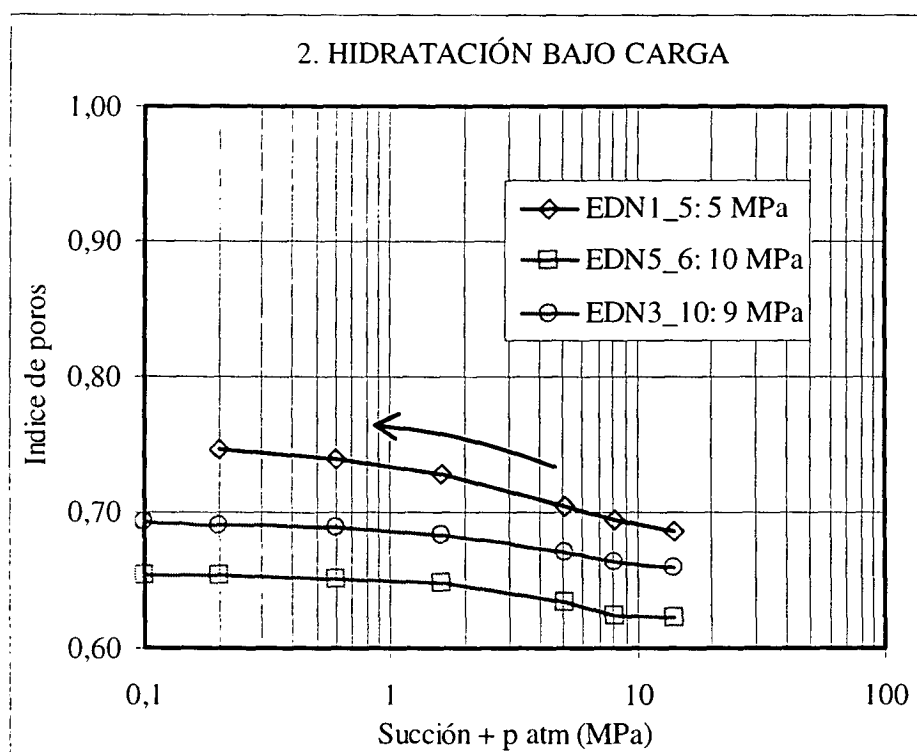


Figura 113: Evolución del índice de poros al disminuir la succión hasta 0 MPa bajo una carga fija indicada en la leyenda (trayectoria E2, tramo 2)

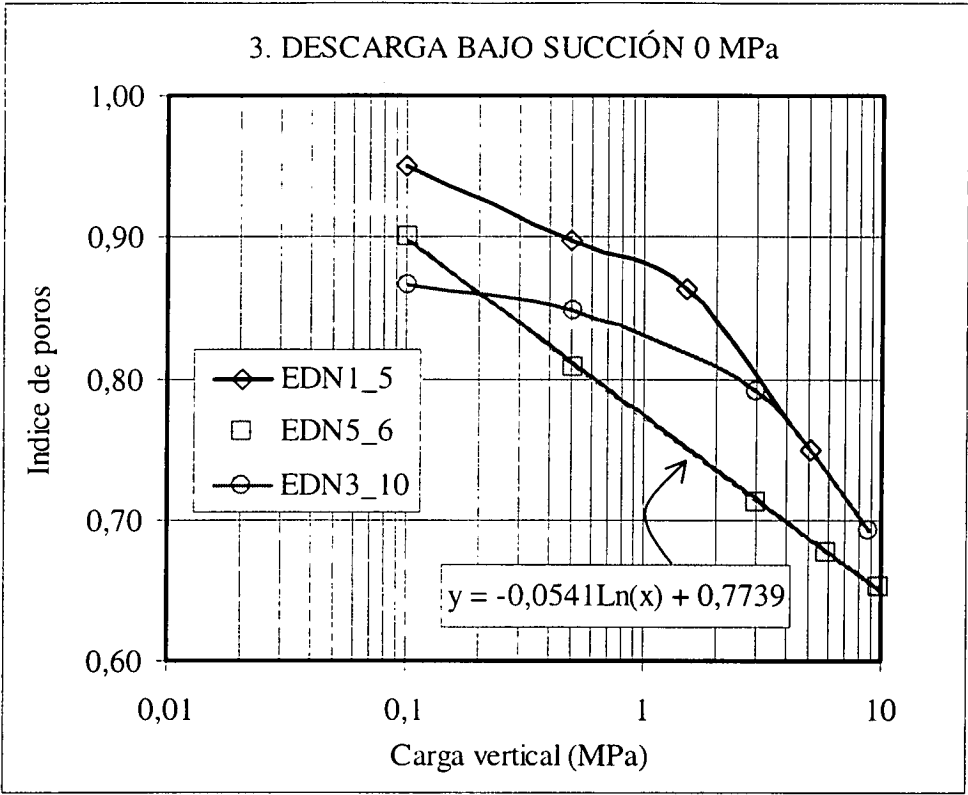


Figura 114: Evolución del índice de poros durante la descarga bajo succión 0 MPa (trayectoria E2, tramo 3)

Trayectoria E3

Se ha realizado un ensayo (EDN4_7) siguiendo la trayectoria E3, que se esquematiza en la Figura 115.

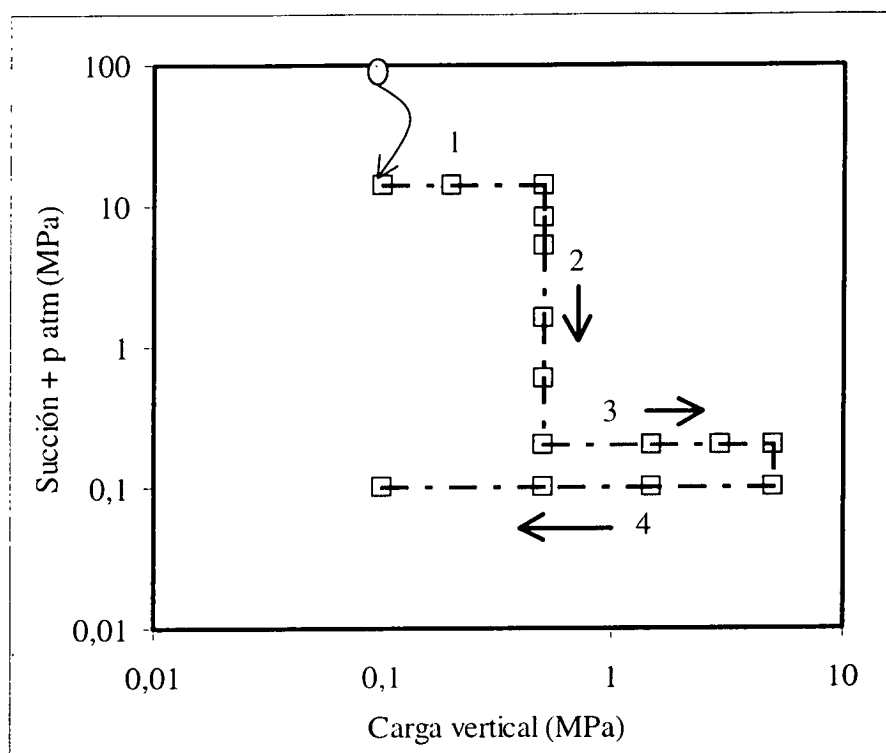


Figura 115: Trayectoria E3 seguida en edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno (ensayo EDN4_7)

Se inicia con una carga desde 0,1 a 0,5 MPa manteniendo la succión en el máximo valor posible (14 MPa). En el primer escalón se produce una disminución de densidad seca desde 1,69 hasta 1,51 g/cm³ (tramo 1, Figura 116). Tras esta pequeña carga se disminuye la succión hasta 0,1 MPa escalonadamente (tramo 2). Una vez saturada la muestra, se procede a su carga hasta el máximo valor posible (5 MPa, tramo 3) y finalmente a su descarga rápida y escalonada (tramo 4). La evolución del índice de poros durante la carga es de tipo lineal, sin que se llegue a recuperar el valor inicial, mientras que durante la descarga es de tipo logarítmico (Figura 117).

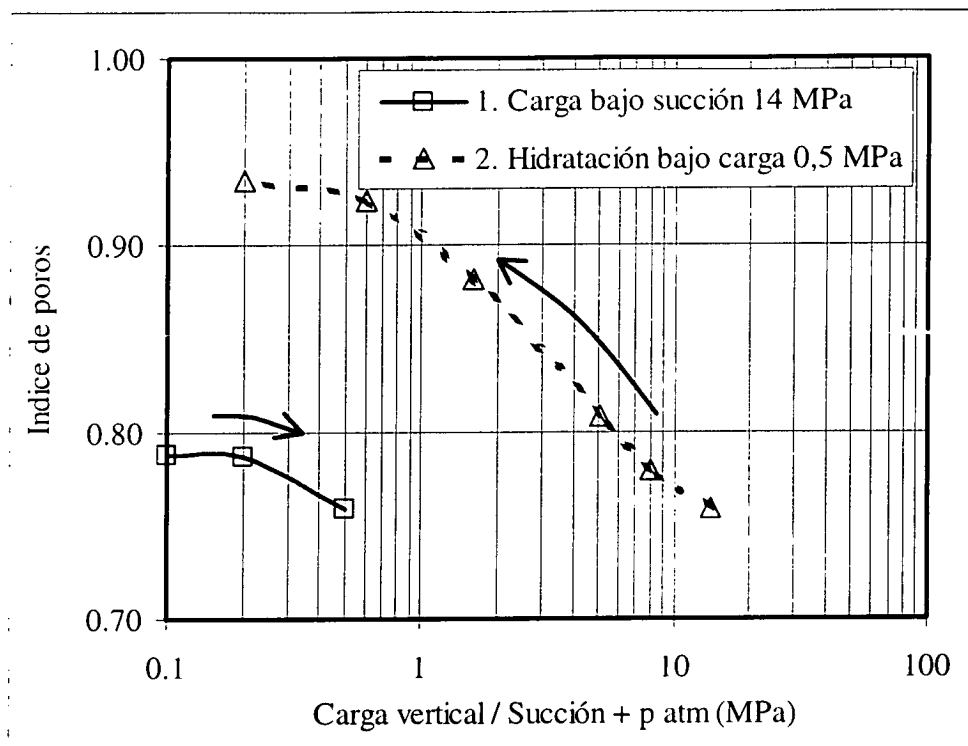


Figura 116: Evolución del índice de poros al cargar hasta 0,5 MPa bajo succión 14 MPa y al disminuir posteriormente la succión bajo una carga de 0,5 MPa (ensayo EDN4_7, e inicial 0,60)

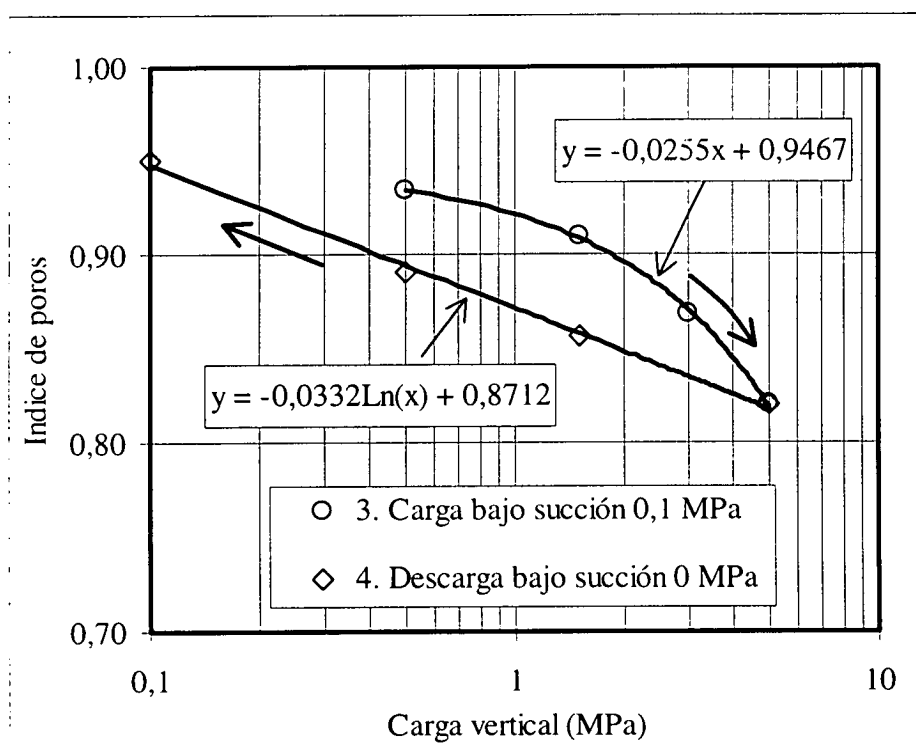


Figura 117: Evolución del índice de poros durante la carga y descarga en saturación (ensayo EDN4_7)

Trayectoria E4/1

Los ensayos EDN2_10 y EDN4_6 son ensayos de disminución de succión bajo una carga elevada: manteniendo una carga constante (la máxima permitida por el aparato, 5 MPa), se reduce la succión por escalones desde 14 hasta 0,1 MPa (EDN2_10) o hasta 0 MPa (EDN4_6). En ambos casos la evolución del índice de poros varía con la succión según una relación logarítmica que se muestra en la Figura 118, y que podría prolongarse hasta los 130 MPa correspondientes a la succión de fabricación de la muestra.

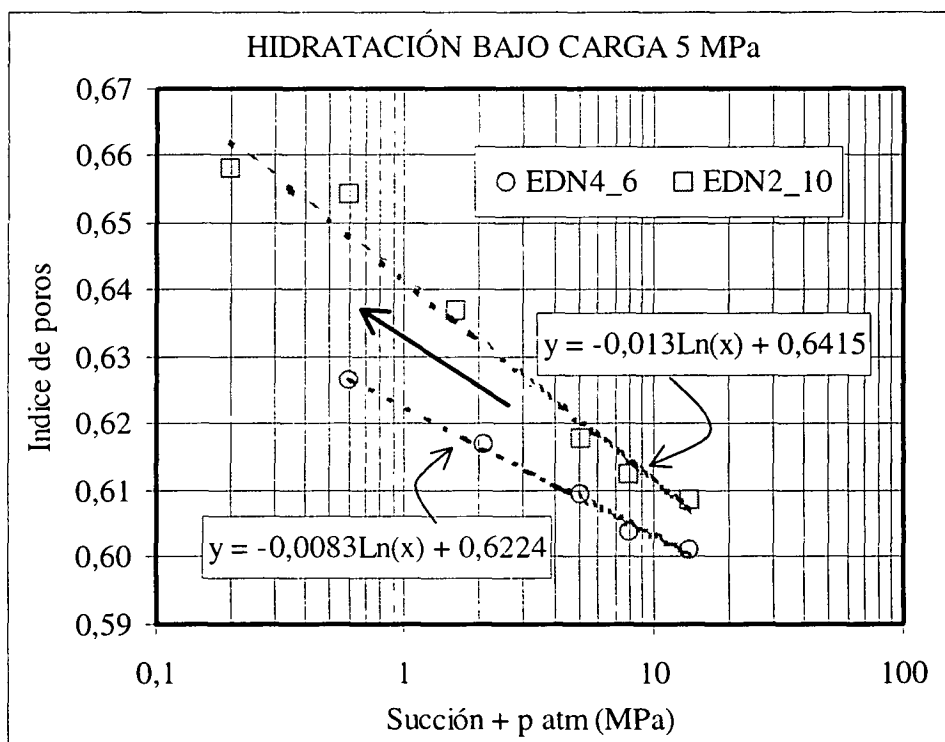


Figura 118: Evolución del índice de poros en dos ensayos al disminuir la succión bajo carga constante de 5 MPa (e inicial 0,58)

Trayectoria E4/2

Se trata de un ensayo de determinación de la presión de hinchamiento a succiones progresivamente menores, comenzando por un valor de 14 MPa y acabando en succión nula, según una trayectoria que se muestra en la Figura 119. La densidad seca inicial de la muestra es de $1,72 \text{ g/cm}^3$, correspondiente a un índice de poros de 0,570.

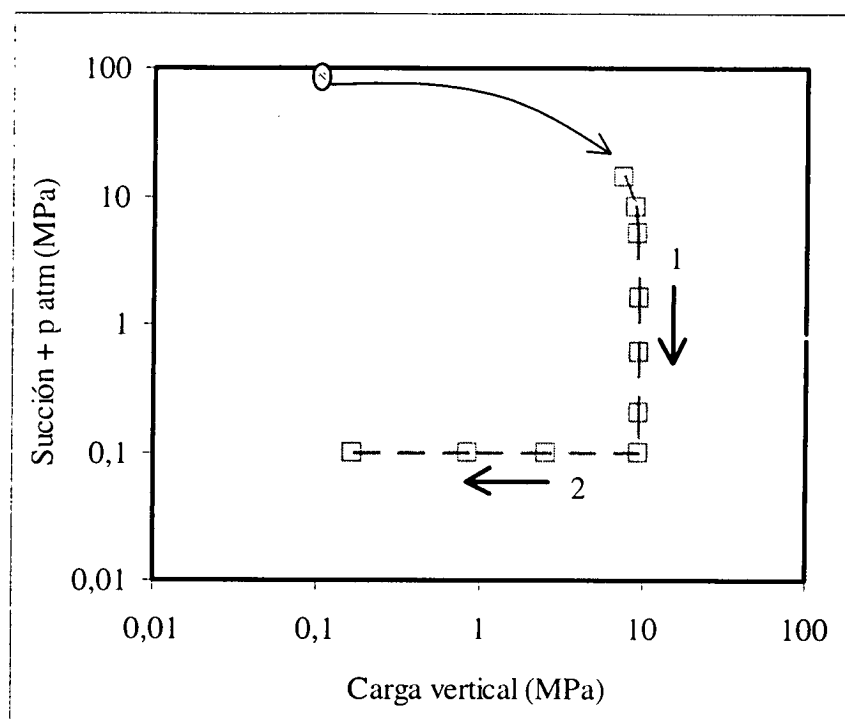


Figura 119: Trayectoria E4/2 seguida en edómetro con control de succión mediante presión de nitrógeno (ensayo EDN3_9)

Para succiones inferiores a 1,5 MPa se llega al límite de carga del aparato, por lo que las presiones aplicadas son menores que la presión de hinchamiento y el índice de poros aumenta (Figura 120). Los aumentos de índice de poros registrados antes de llegar al límite de carga del aparato son debidos a errores experimentales. Una vez saturada la muestra, al llegar a succión nula, se alcanza una densidad seca de $1,68 \text{ g/cm}^3$ bajo la máxima carga permitida por el equipo, que es de 9,5 MPa. Este valor de presión de hinchamiento está en el orden de los valores obtenidos para la arcilla saturada según el ajuste deducido en la sección “Presión de hinchamiento”. A continuación se realiza la descarga rápida y escalonada de la muestra (Figura 121).

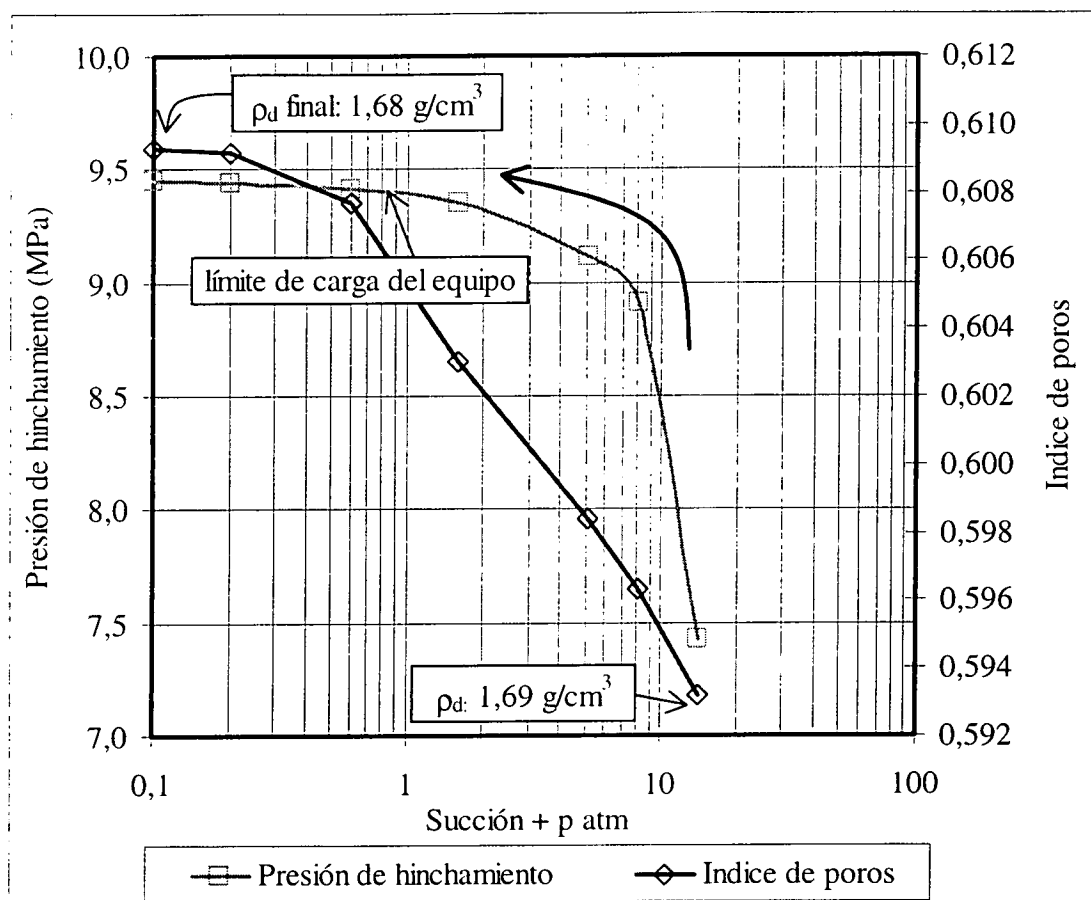


Figura 120: Evolución del índice de poros y de la presión de hinchamiento al disminuir la succión de 14 a 0 MPa en el ensayo EDN3_9 (densidad seca inicial: 1,72 g/cm³, e; 0,570)

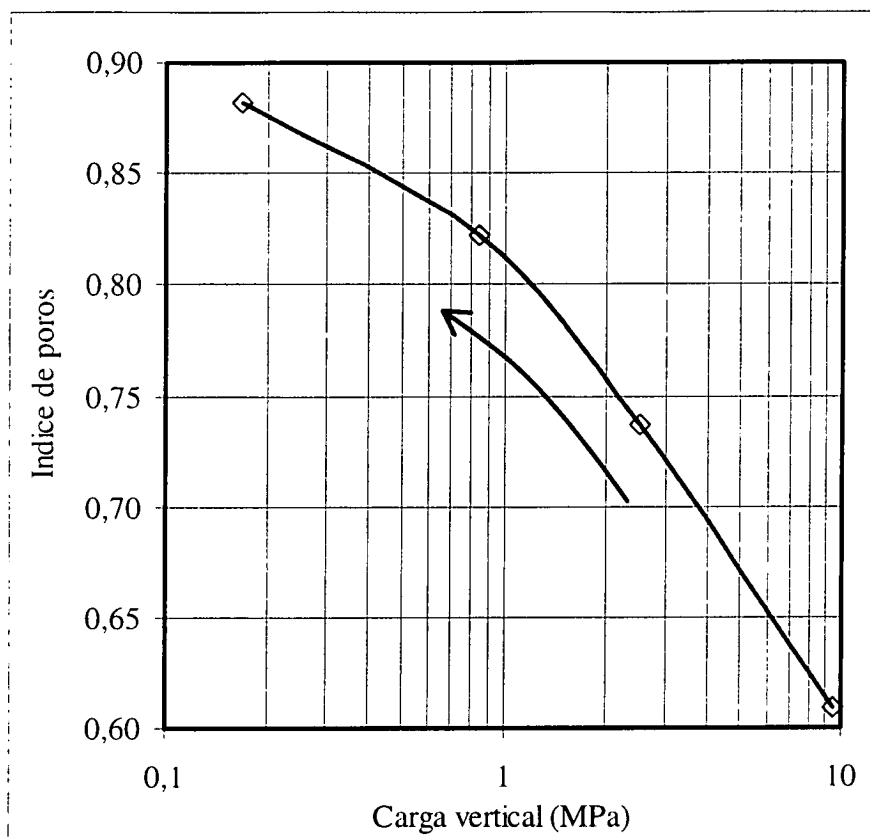


Figura 121: Evolución del índice de poros durante la descarga final en saturación en el ensayo EDN3_9

Edómetros con control de succión mediante disoluciones

Se han realizado 8 ensayos edométricos a 20 °C con control de succión mediante disoluciones de ácido sulfúrico, siguiendo 7 trayectorias distintas. La succión máxima aplicada ha sido de 550 MPa. El valor mínimo de succión se consigue rellenando el depósito de la celda edométrica con agua destilada. Tras realizar cierto número de ensayos, se comprobó que algo de ácido sulfúrico del escalón de succión anterior siempre quedaba en el depósito, por lo que la densidad final de la disolución es superior a la del agua destilada, y genera una humedad relativa correspondiente a una succión de entre 1,0 y 1,5 MPa. Debido a que la comprobación final de densidad de la disolución del último escalón no se ha realizado sistemáticamente, se ha tomado un valor fijo de 1,3 MPa para la succión aplicada cuando se vierte agua destilada en el depósito.

Las trayectorias seguidas se representan en la Figura 122 y en la Figura 123, en las que se indican las condiciones iniciales de la muestra mediante un círculo. La mayoría de los ensayos realizados en estos edómetros reproducen las condiciones de la bentonita en zonas próximas al calentador, que sufrirán cierta desecación inicial (trayectorias E1/1, E1/2, E2, E3); o bien en zonas intermedias de la barrera, a las que el frente de hidratación tardará en llegar, por lo que su grado de saturación permanecerá invariable durante un tiempo (trayectoria E5). La desecación se simula mediante aumentos de succión bajo una carga pequeña, ya que inicialmente habrá cierto hueco entre el calentador y la bentonita y ésta no se verá comprimida. Los tramos de carga posteriores reproducen la compresión que el material sufre debido a las presiones de hinchamiento desarrolladas por la bentonita circundante a la que ya ha llegado el frente de hidratación. Por el contrario, la trayectoria E6 es análoga a la que sufre la bentonita en la zona cercana al borde exterior de la barrera, donde se hidrata inicialmente a volumen libre –puesto que existe un hueco entre los bloques de bentonita y la roca almacén– para posteriormente verse comprimida por el hinchamiento de la arcilla colocada en zonas más alejadas del borde, a medida que progresa el frente de hidratación hacia el centro de la galería.

Las trayectorias E1/1, E1/2 y E4 incluyen tramos de determinación de la presión de hinchamiento. Para un suelo no saturado la presión de hinchamiento se puede definir como la carga externa que impide cualquier cambio de volumen cuando la muestra se hidrata (Gens & Alonso 1992), y con este sentido se ha utilizado el término en este trabajo.

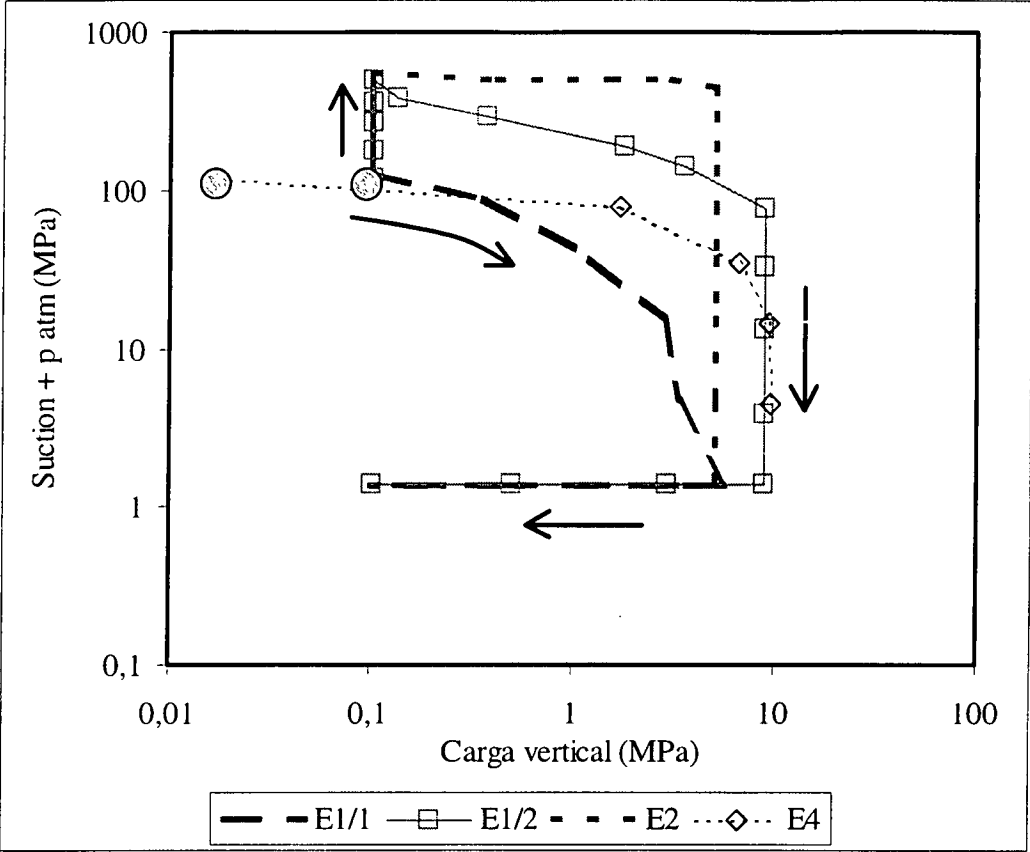


Figura 122: Trayectorias seguidas en los ensayos edométricos con control de succión mediante disoluciones de ácido sulfúrico de tipo E1/1, E1/2, E2 y E4

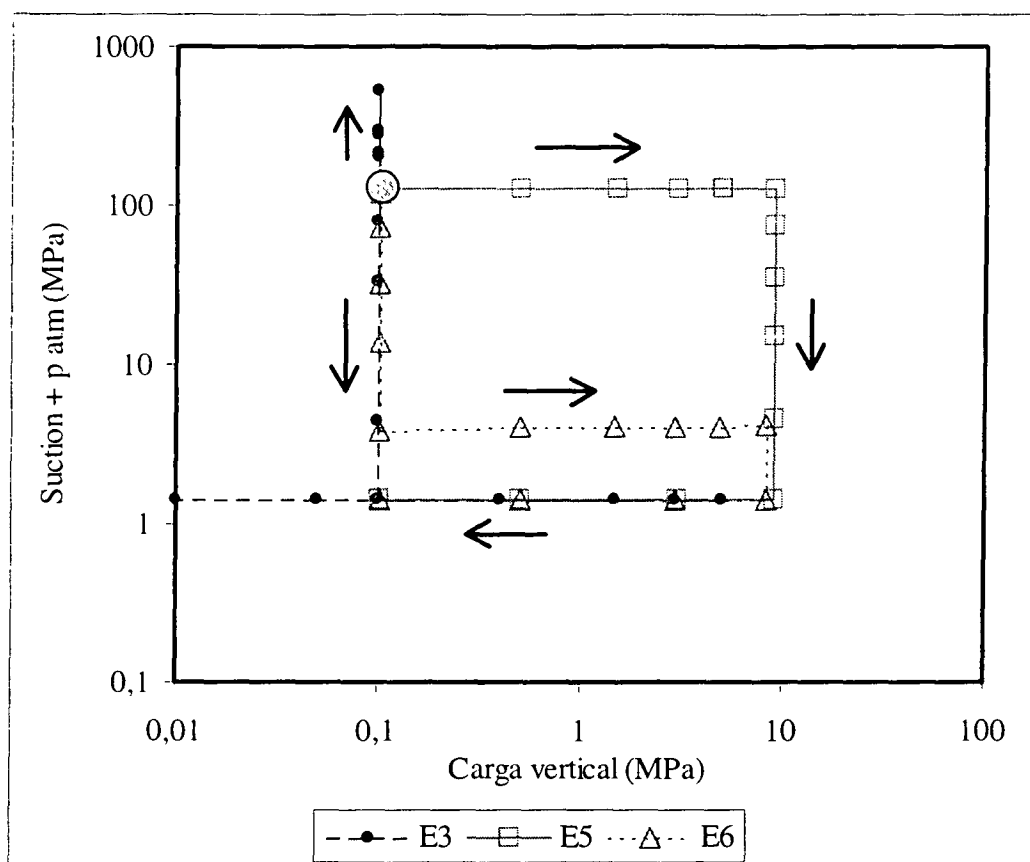


Figura 123: Trayectorias seguidas en los ensayos edométricos con control de succión mediante disoluciones de ácido sulfúrico de tipo E3, E5 y E6

Al finalizar los ensayos, algunas muestras han sido analizadas al microscopio electrónico de barrido. En ellas se han observado cristales de yeso de diferentes morfologías, lo que no es habitual en la bentonita que no ha sufrido tratamiento ni en la que procede de ensayos edométricos realizados con control de succión mediante presión de nitrógeno. El origen de estos cristales no está claro, ni tampoco su repercusión sobre el comportamiento de la bentonita. Puesto que no se han encontrado en otro tipo de muestras, parece que el origen debe tener alguna relación con la técnica experimental. Quizá durante la manipulación de la disolución, parte de ella podría haber salpicado la muestra y reaccionado con el calcio del complejo de cambio. De hecho, los aglomerados de cristales de pequeño tamaño (2-3 μm) podrían corresponder a neoformaciones (Figura 124). Sin embargo, otras morfologías observadas, como cristales alargados de 10 a 20 μm de longitud, agrupaciones de cristales aciculares, así como grandes cristales, no apoyan esta hipótesis (Figura 125).

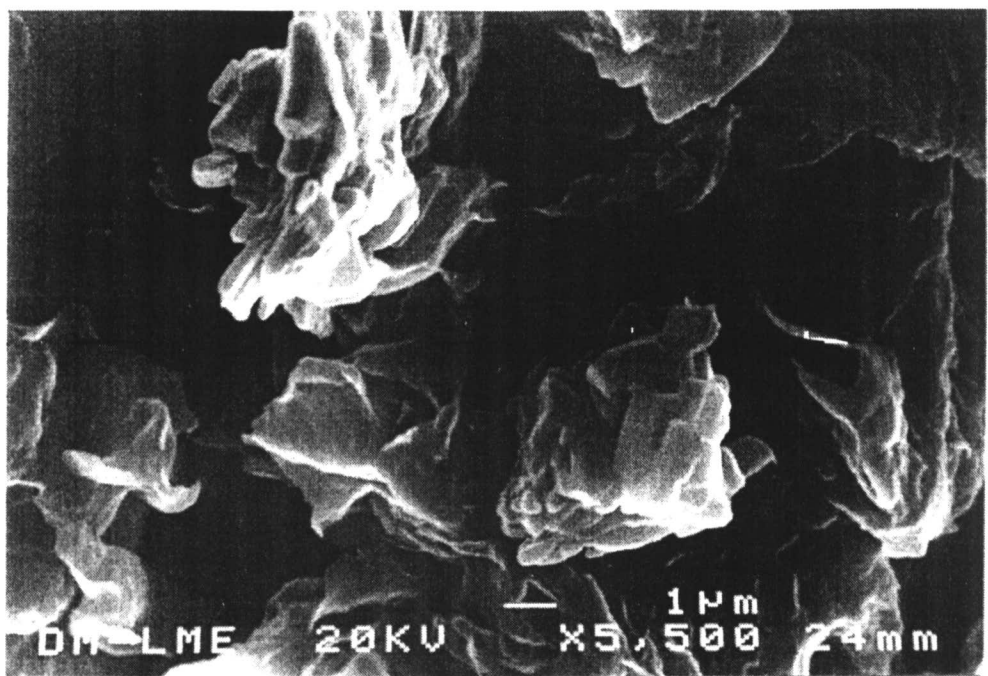


Figura 124: Aglomerados de cristales de yeso de 1-2 μm en la muestra procedente del ensayo EDS4_8 (fotografía tomada al microscopio electrónico de barrido a 5500 aumentos)

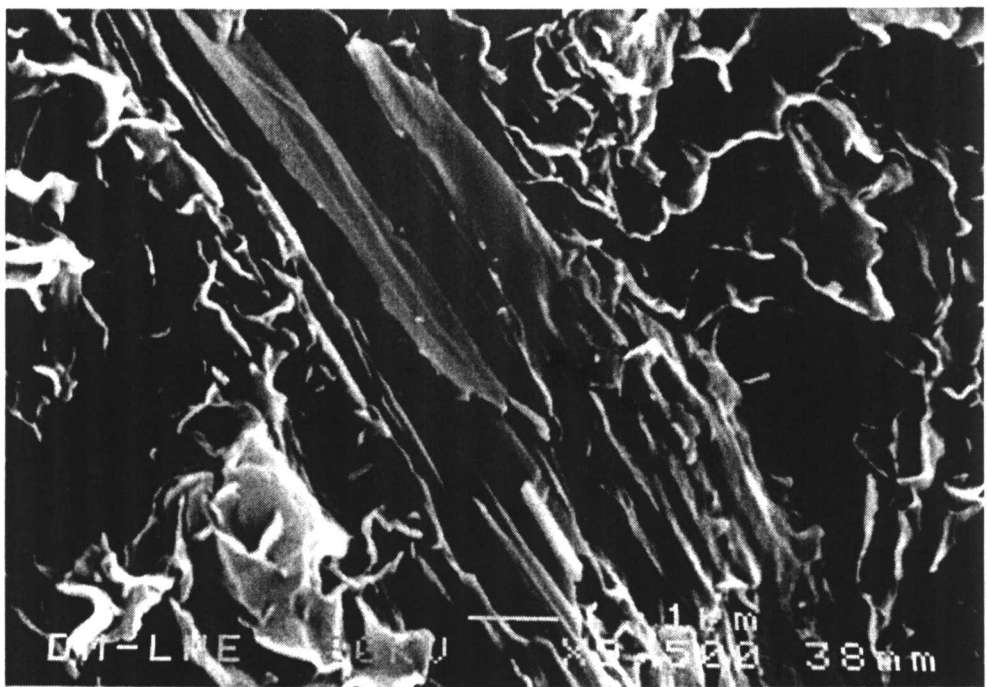


Figura 125: Cristal de yeso alargado en la muestra procedente del ensayo EDS2_9 (fotografía tomada al microscopio electrónico de barrido a 9500 aumentos)

Trayectoria E1/1

El ensayo EDS4_6, tras estabilización a la succión correspondiente a la humedad de fabricación de las pastillas (unos 130 MPa), sigue una trayectoria inicial de secado hasta succiones próximas a los 500 MPa, bajo una carga de 0,1 MPa (Figura 126, tramo 1). Bajo esta misma carga se vuelve a hidratar la muestra hasta el valor de la succión inicial (tramo 2), y a continuación se carga progresivamente según se va disminuyendo la succión, intentando mantener constante el volumen de la muestra (tramo 3), antes de proceder a la descarga final (tramo 4).

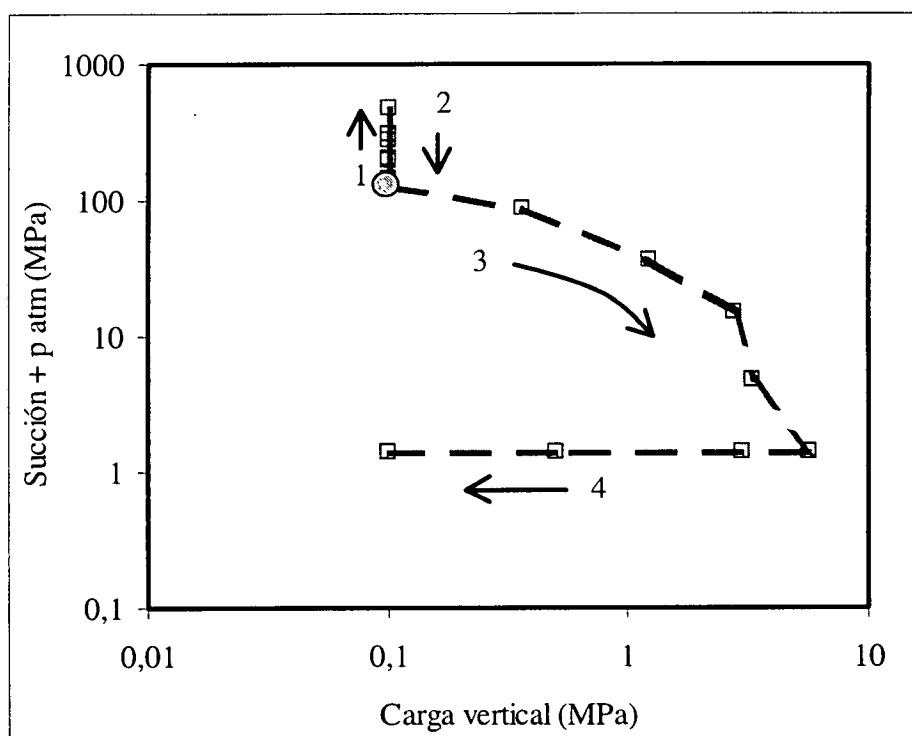


Figura 126: Trayectoria E1/1 en edómetro con control de succión mediante disoluciones (ensayo EDS4_6)

El secado inicial produce un aumento de la densidad seca de la muestra desde un valor de $1,70 \text{ g/cm}^3$ hasta $1,73 \text{ g/cm}^3$. Tras el secado se produce la hidratación de la muestra, con lo que ésta va recuperando la pérdida de volumen sufrida durante la desecación. La evolución de la deformación en los diferentes escalones correspondientes a la rama de secado y a la de hidratación bajo carga de 0,1 MPa se muestra en la Figura 127, en la que se comprueba que los procesos de transferencia de humedad por efecto del cambio de succión son lentos,

no apreciándose deformación hasta después de 10 horas. Los índices de poros al final de cada escalón de los tramos de secado y humectación se representan en la Figura 128. Una vez alcanzada la densidad seca inicial, lo que sucede para una succión comprendida entre 130 y 90 MPa, se mantiene el volumen de la muestra aproximadamente constante mediante la adición de cargas, a la vez que se sigue disminuyendo la succión, con lo que se obtiene el valor de la presión de hinchamiento para succiones progresivamente menores (Figura 129). Para succiones por debajo de 5 MPa, la capacidad de carga del equipo no es suficiente para contrarrestar el hinchamiento de la arcilla, por lo que se produce un importante aumento del índice de poros. Para la mínima succión, la densidad seca de la muestra se reduce hasta 1,63 g/cm³, con una presión de hinchamiento de 5,7 MPa, que corresponde al límite de carga del aparato. Según la relación ajustada entre densidad seca y presión de hinchamiento de la muestra saturada, el valor de presión de hinchamiento para esta densidad seca sería de 7,2 MPa, por lo que el valor obtenido en este ensayo es inferior al teórico, aunque dentro del rango probable de variación (25 %, cf. sección “Presión de hinchamiento”). El ensayo finaliza con la descarga rápida y escalonada una vez alcanzada la saturación total (Figura 130), en la que el índice de poros aumenta de forma logarítmica.

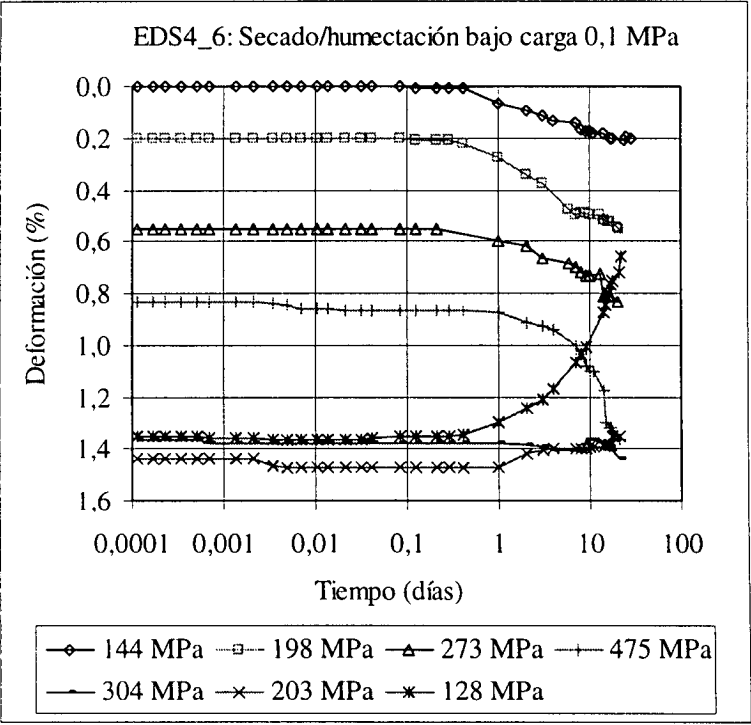


Figura 127: Evolución de la deformación en función del tiempo en los diferentes escalones de la trayectoria secado/humectación bajo carga 0,1 MPa en el ensayo EDS4_6

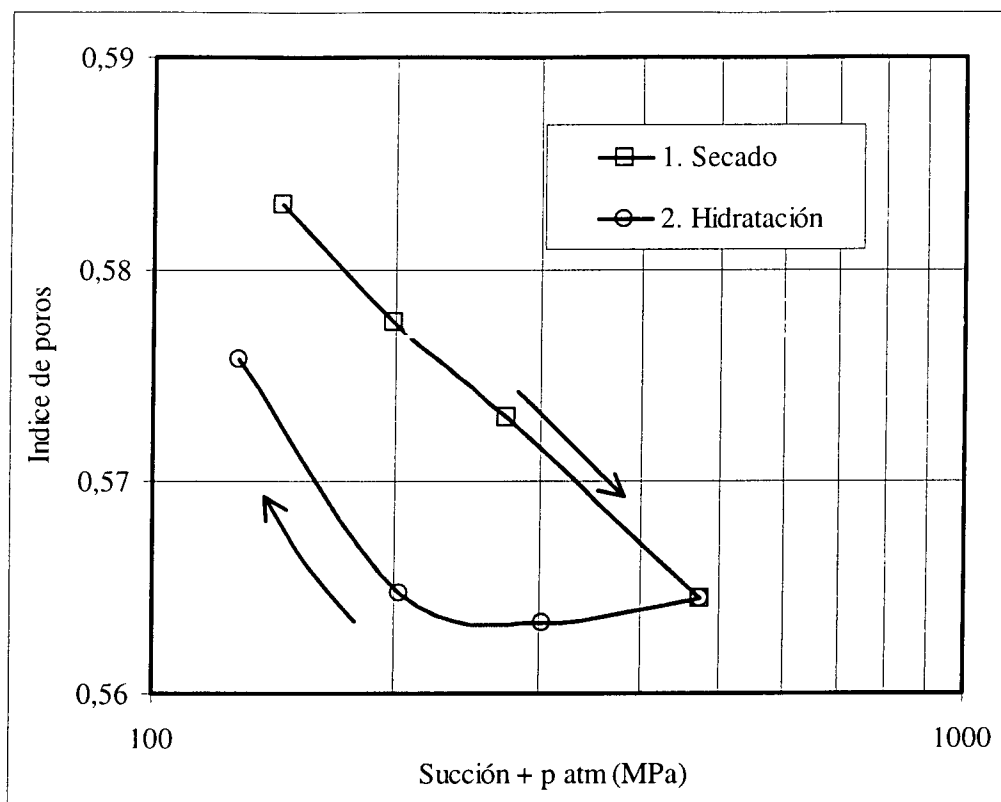


Figura 128: Índices de poros correspondientes a los diferentes escalones de la rama de secado e hidratación bajo carga 0,1 MPa en el ensayo EDS4_6

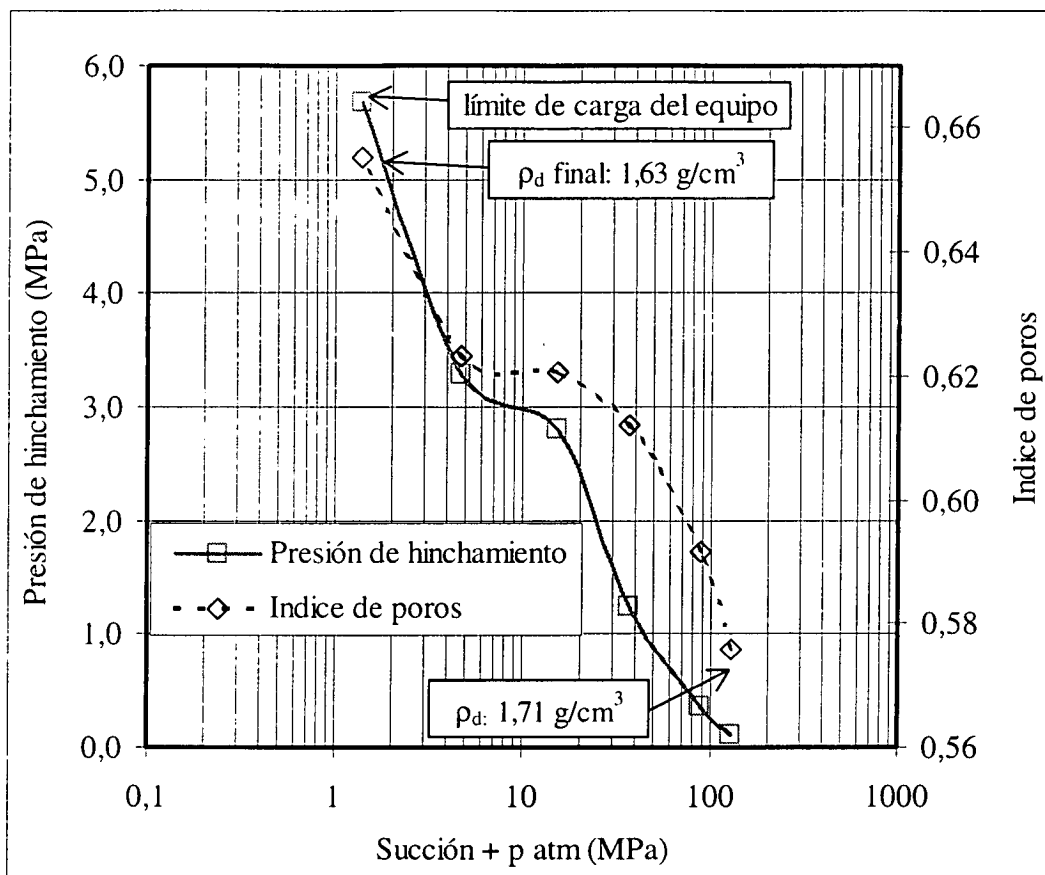


Figura 129: Presión de hinchamiento y variación del índice de poros al disminuir la succión tras secado intenso en el ensayo EDS4_6

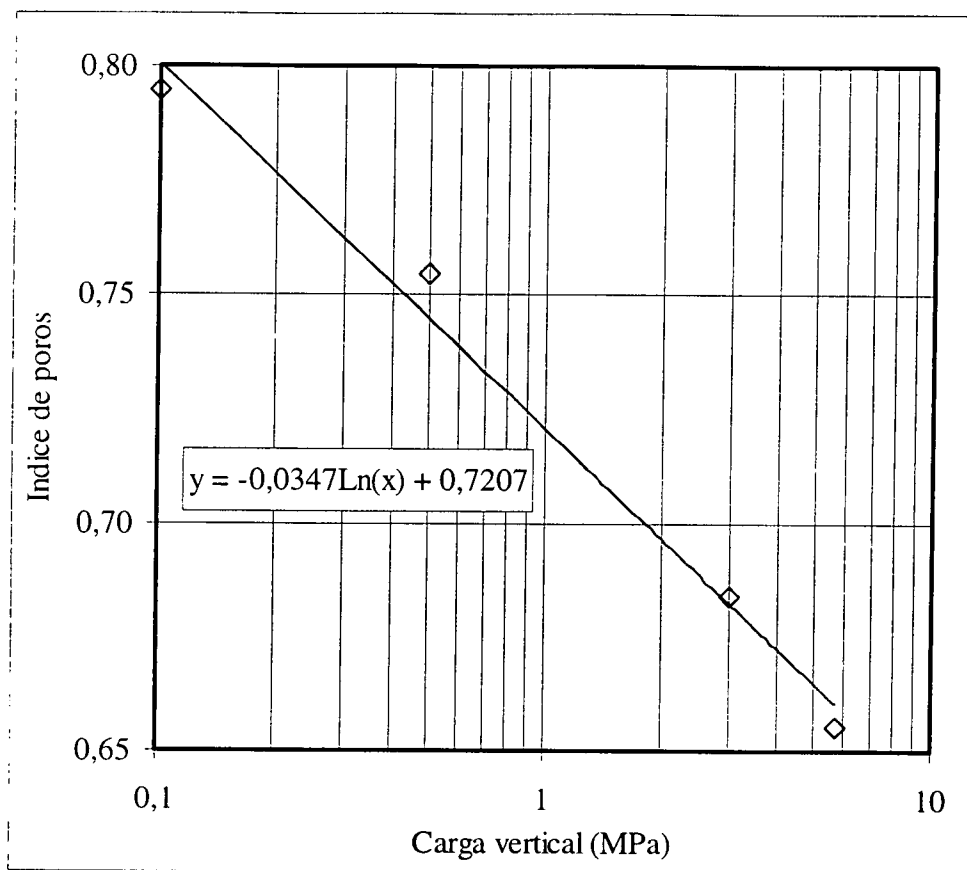


Figura 130: Variación del índice de poros al descargar bajo succión 1,3 MPa en el ensayo EDS4_6

Trayectoria E1/2

El ensayo EDS3_10, tras estabilización a la succión correspondiente a la humedad de fabricación de las pastillas (unos 130 MPa), sigue una trayectoria inicial de secado hasta succión de 500 MPa, bajo una carga de 0,1 MPa (Figura 131, tramo 1). A continuación se disminuye la succión a la vez que se va cargando la muestra, con el objetivo de mantener su volumen constante (tramo 2). Finalmente se procede a la descarga (tramo 3).

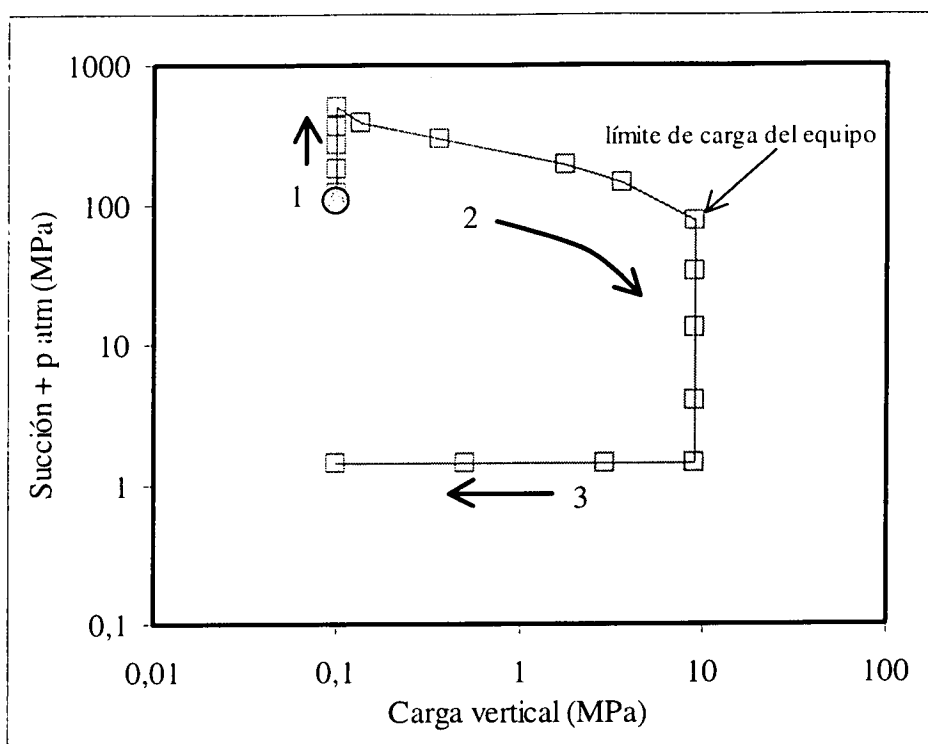


Figura 131: Trayectoria E1/2 en edómetro con control de succión mediante disoluciones (ensayo EDS3_10)

El secado produce un aumento de la densidad seca de la muestra desde un valor de $1,71 \text{ g/cm}^3$ hasta $1,74 \text{ g/cm}^3$. Tras el secado se produce la hidratación de la muestra por disminución progresiva de la succión. Durante el proceso de disminución de la succión, se intenta mantener constante el volumen de la muestra alcanzado al final de la desecación, mediante la adición de las cargas pertinentes. De esta manera se mantiene constante la densidad seca que se alcanzó al final del secado, por lo que se obtienen los valores de presión de hinchamiento a succiones progresivamente menores para una densidad seca de $1,74 \text{ g/cm}^3$. Los sucesivos valores del índice de poros durante la trayectoria de secado/humectación y los de la presión de hinchamiento se muestran en la Figura 132. Se observa cómo, para succiones por debajo de 80 MPa, la presión de hinchamiento de la muestra supera el límite de carga del equipo (9 MPa), por lo que su densidad seca empieza a disminuir, llegándose a un valor de $1,63 \text{ g/cm}^3$ para succión de 4 MPa, que se mantiene hasta el valor mínimo de succión. Este último dato hace suponer que la muestra está ya completamente saturada para succiones de 4 MPa, y que, por tanto, ya no existen poros mayores de $0,08 \text{ }\mu\text{m}$ (macroporos), que es el diámetro de poro máximo al que afecta esta succión según la ecuación de Jurin-Laplace. Además, el posible hinchamiento de la

microestructura se podría ver compensado por el colapso de la macroestructura debido a la elevada carga aplicada y a la disminución de la presión de presconsolidación durante la hidratación. La presión de hinchamiento de 9 MPa es superior a la teórica para una muestra saturada de densidad seca 1,63 g/cm³, que sería de 7 MPa (cf. sección “Presión de hinchamiento”).

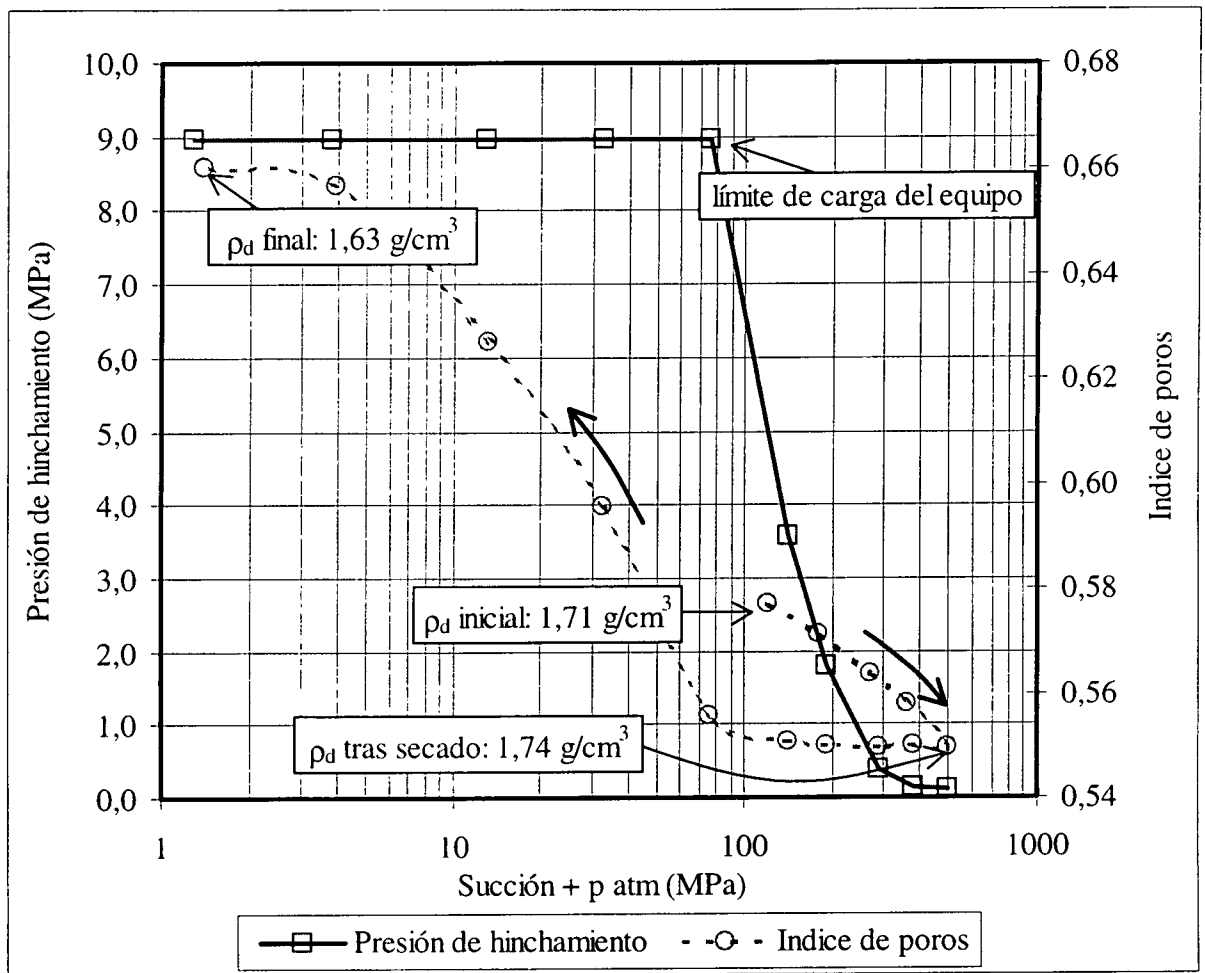


Figura 132: Variación del índice de poros durante el secado y la hidratación a volumen constante, con medida de la presión de hinchamiento, en el ensayo EDS3_10

El ensayo finaliza con la descarga escalonada y rápida de la muestra saturada (Figura 133).

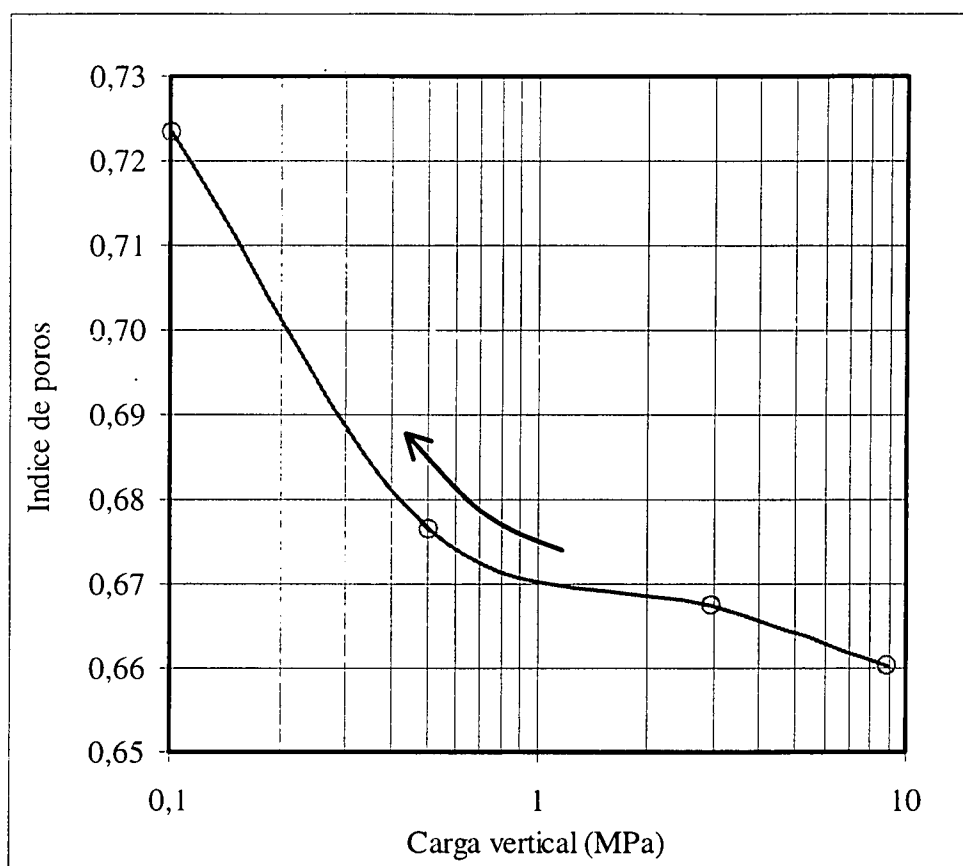


Figura 133: Variación del índice de poros al descargar bajo succión 1,3 MPa en el ensayo EDS3_10

Trayectoria E2

La trayectoria E2 en edómetro con control de succión mediante disoluciones consta de 4 tramos, representados en la Figura 134. Inicialmente se aumenta la succión bajo una carga vertical pequeña (tramo 1); a continuación se carga la muestra manteniendo el máximo valor de succión alcanzado (tramo 2); después se reduce la succión para hidratar la muestra bajo esta carga elevada (tramo 3); y finalmente se descarga (tramo 4).

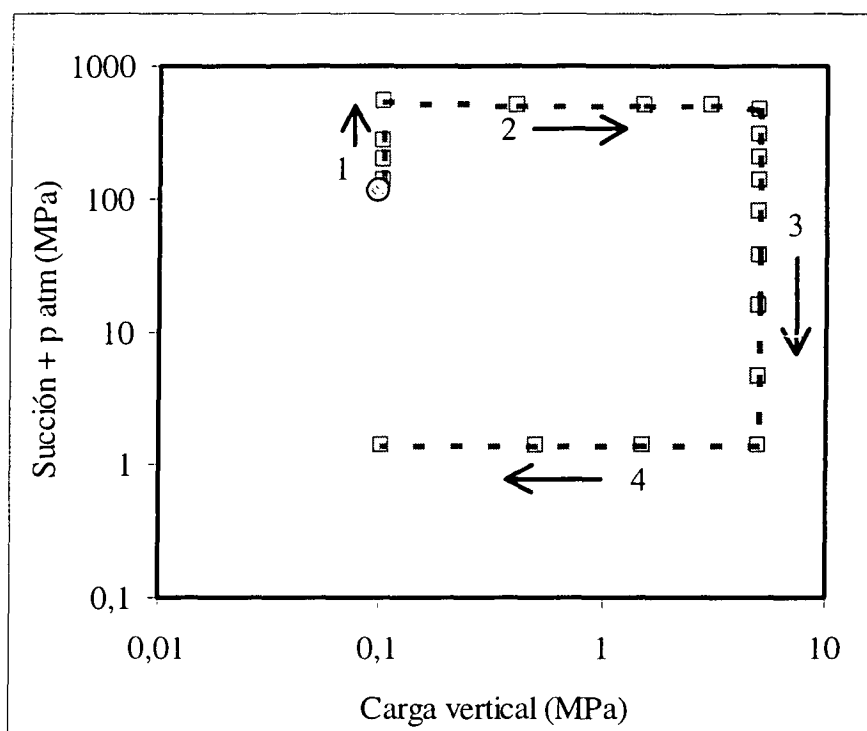


Figura 134: Trayectoria E2 en edómetro con control de succión mediante disoluciones (ensayo EDS3_9)

El ensayo EDS3_9 comienza con un secado desde la succión inicial de 138 MPa hasta 551 MPa, bajo una carga de 0,1 MPa, produciéndose una disminución de índice de poros desde 0,569 (ρ_d : 1,72 g/cm³) hasta 0,543, con lo que se alcanza una densidad seca de 1,75 g/cm³. Posteriormente la muestra se carga hasta 5 MPa manteniendo constante la elevada succión alcanzada (más de 500 MPa). Esto da lugar a un nuevo aumento de la densidad seca, que pasa a ser de 1,77 g/cm³. A continuación se hidrata la muestra por disminución progresiva de la succión, con lo que la densidad seca disminuye hasta 1,61 g/cm³.

Los índices de poros alcanzados al final de cada escalón de las trayectorias descritas se muestran en la Figura 135, en la que en el eje de abscisas aparecen representados los valores tanto de carga como de succión, ya que ambos tienen las mismas unidades, quedando aclarado en la leyenda de la figura a qué trayectoria se refiere cada línea.

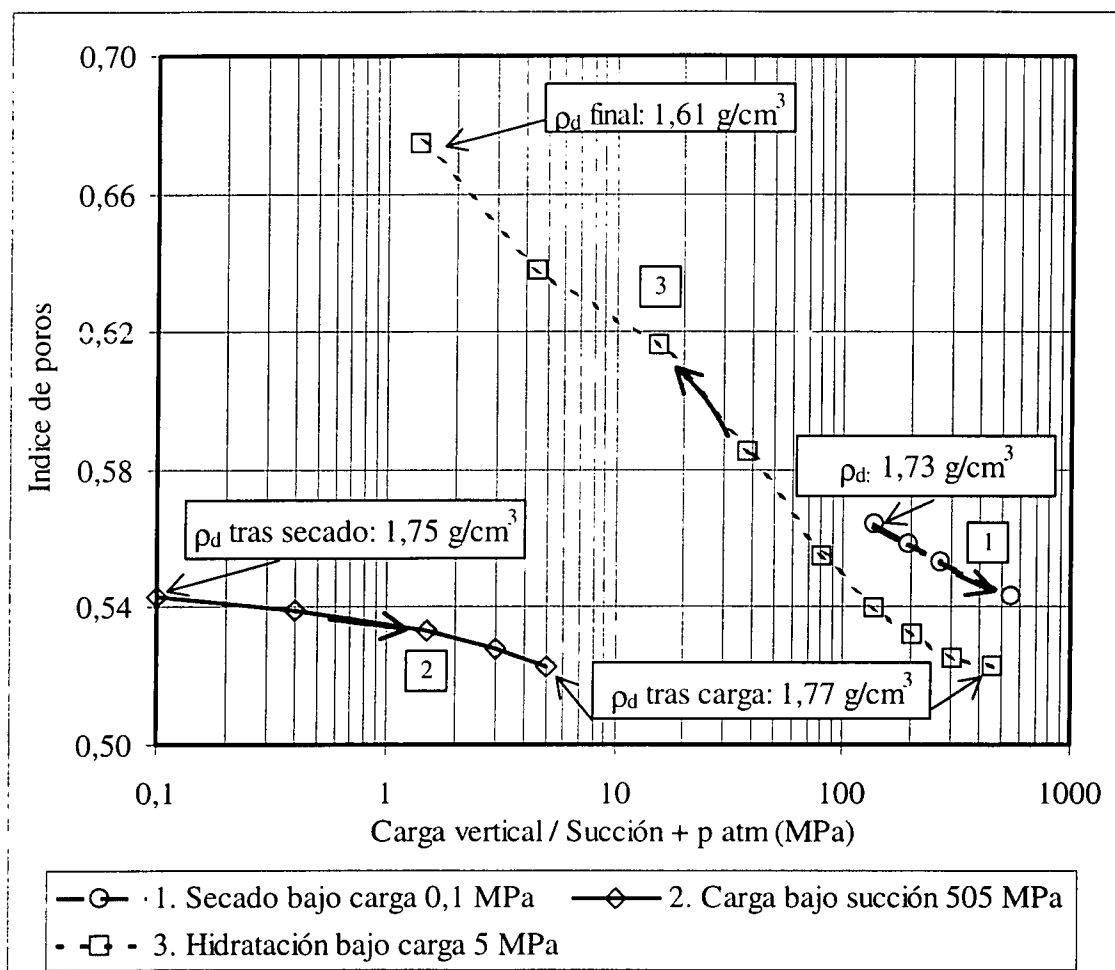


Figura 135: Índices de poros finales en las trayectorias sucesivas de secado, carga e hidratación en el ensayo EDS3_9

El ensayo finaliza con la descarga rápida y escalonada de la muestra saturada, durante la que el índice de poros aumenta de forma logarítmica con la succión, según se muestra en la Figura 136.

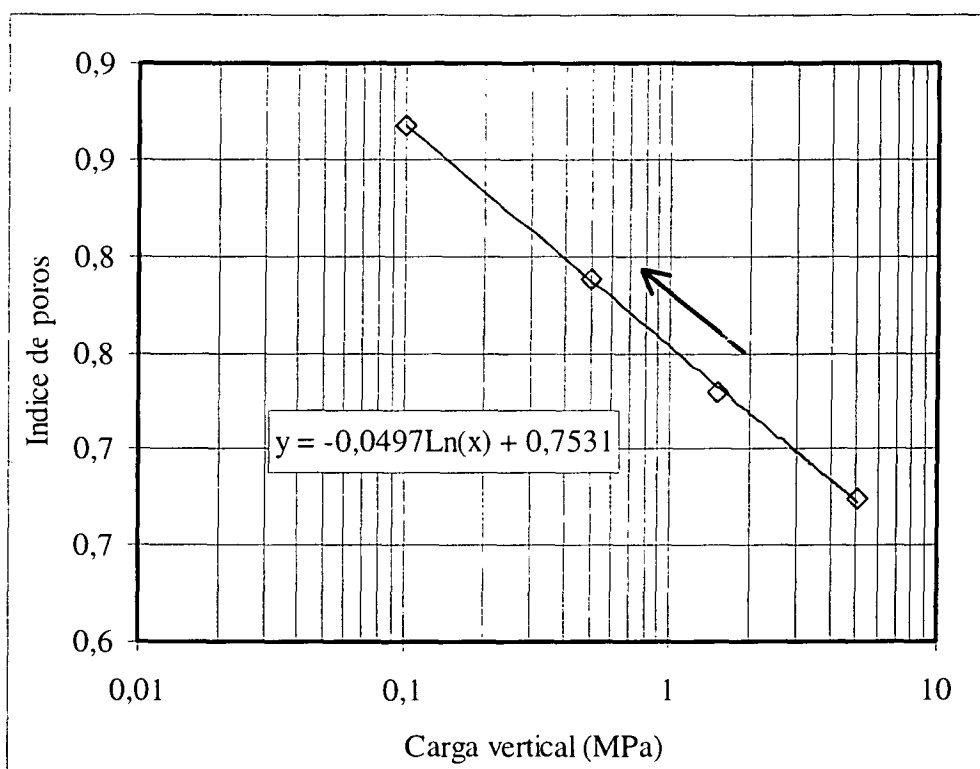


Figura 136: Índices de poros finales de los sucesivos escalones de descarga bajo succión 1,3 MPa del ensayo EDS3_9

Trayectoria E3

La trayectoria E3 comienza por el aumento de la succión a la que se somete la muestra bajo una carga pequeña (Figura 137, tramo 1), y sigue con una disminución de la succión hasta el mínimo valor posible, manteniendo la misma carga (tramo 2). A continuación se carga la muestra bajo este pequeño valor de succión (tramo 3), y finalmente se descarga (tramo 4).

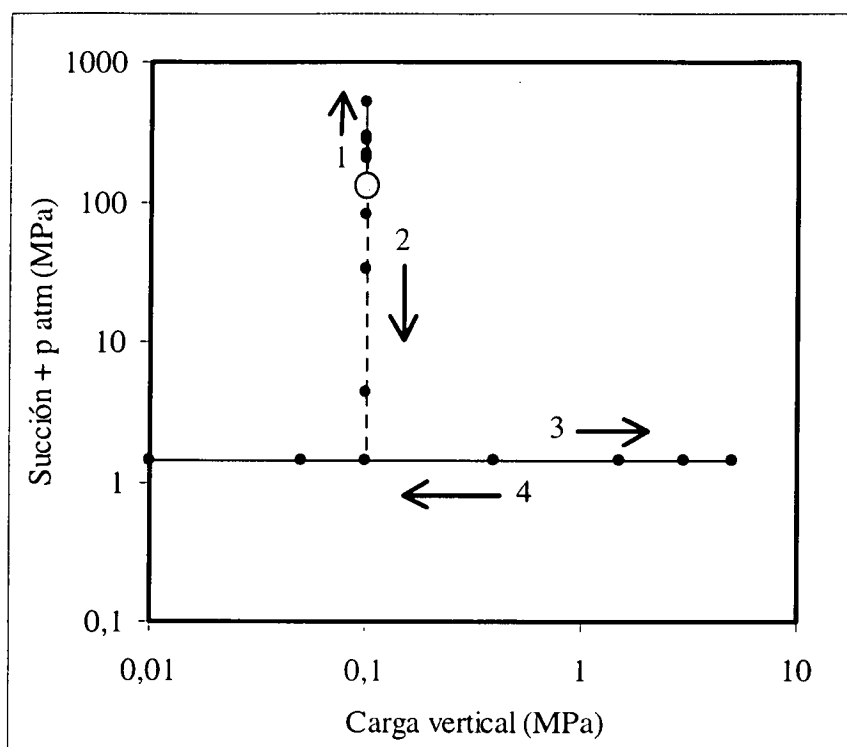


Figura 137: Trayectoria E3 en edómetro con control de succión mediante disoluciones: ensayo EDS5_5 y EDS4_8 (éste sólo tramos 1 y 2)

El ensayo EDS5_5 comienza con un secado desde la succión inicial de 138 MPa hasta la succión de 520 MPa, bajo una carga de 0,1 MPa, produciéndose una disminución del índice de poros desde 0,571 (ρ_d : 1,72 g/cm³) hasta 0,546, con lo que se alcanza una densidad seca de 1,75 g/cm³. Posteriormente la muestra se hidrata por disminución progresiva de la succión, manteniendo constante la carga inicial de 0,1 MPa. Esto da lugar a una disminución muy importante de la densidad seca, que pasa a ser de 1,31 g/cm³. A continuación se carga la muestra hasta 5 MPa, con lo que la densidad seca vuelve a aumentar hasta 1,54 g/cm³.

Los índices de poros alcanzados al final de cada escalón de las trayectorias descritas se muestran en la Figura 138, en la que en el eje de abscisas aparecen representados los valores tanto de carga como de succión.

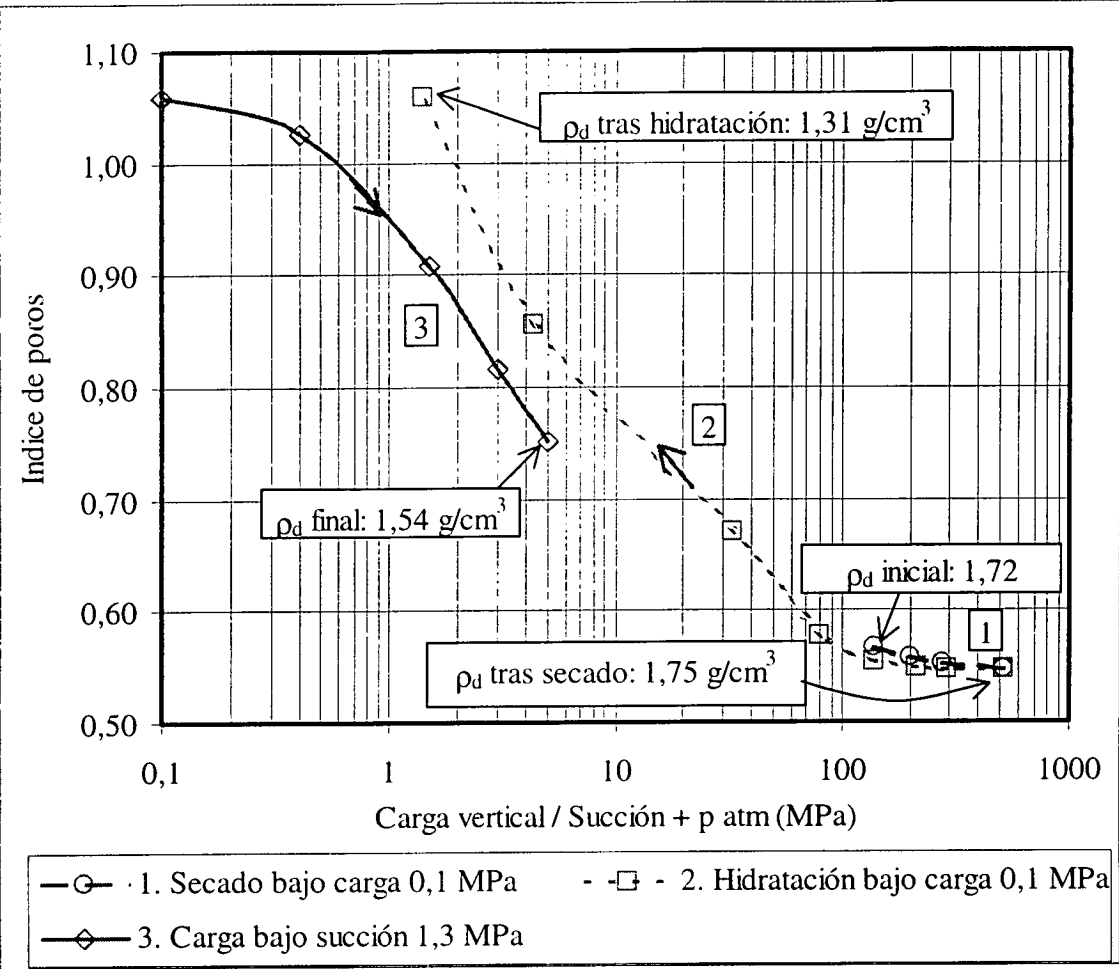


Figura 138: Índices de poros finales en las trayectorias de secado, hidratación y carga en el ensayo EDS5_5

El ensayo finaliza con la descarga rápida y escalonada de la muestra saturada, durante la que el índice de poros aumenta de forma logarítmica con la succión, según se muestra en la Figura 139.

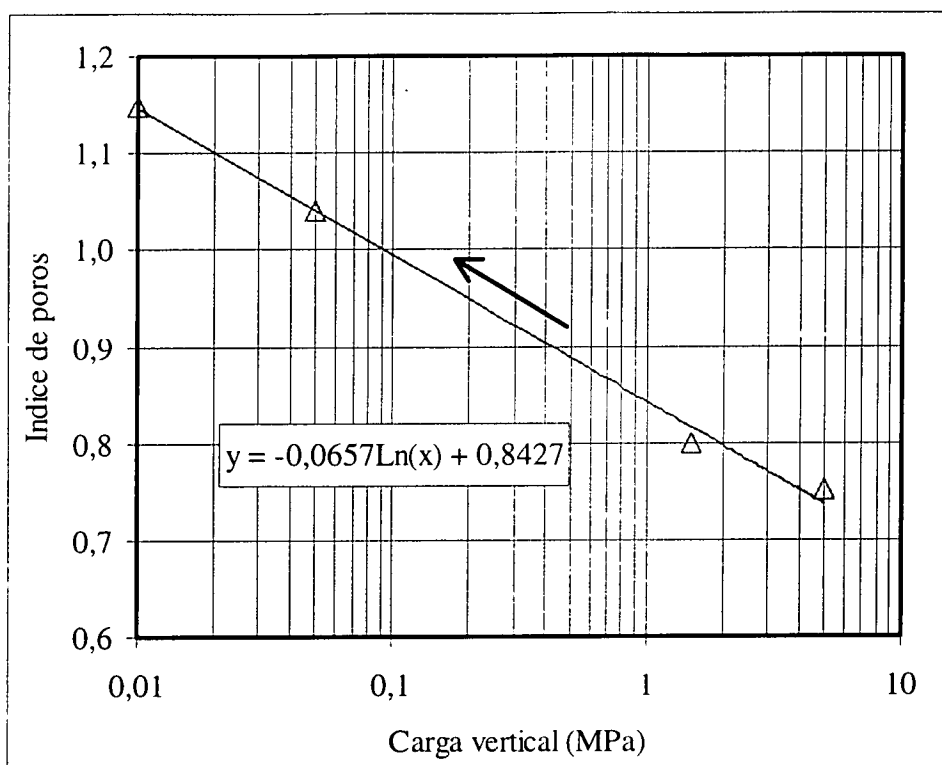


Figura 139: Índices de poros finales de los sucesivos escalones de descarga bajo succión 1,3 MPa del ensayo EDS5_5

Las ramas de secado e hidratación inicial se han seguido también en el ensayo EDS4_8. Los índices de poros finales de los sucesivos escalones de este ensayo se muestran en la Figura 140, donde se han vuelto a representar los valores obtenidos en el ensayo EDS5_5 para comparación. El comportamiento de la arcilla es análogo en ambos ensayos, pudiendo justificarse las diferencias en los índices de poros alcanzados por la pequeña disparidad inicial en la densidad seca de ambas muestras. La Figura 141 es una ampliación de la zona de la figura anterior correspondiente a las succiones más altas.

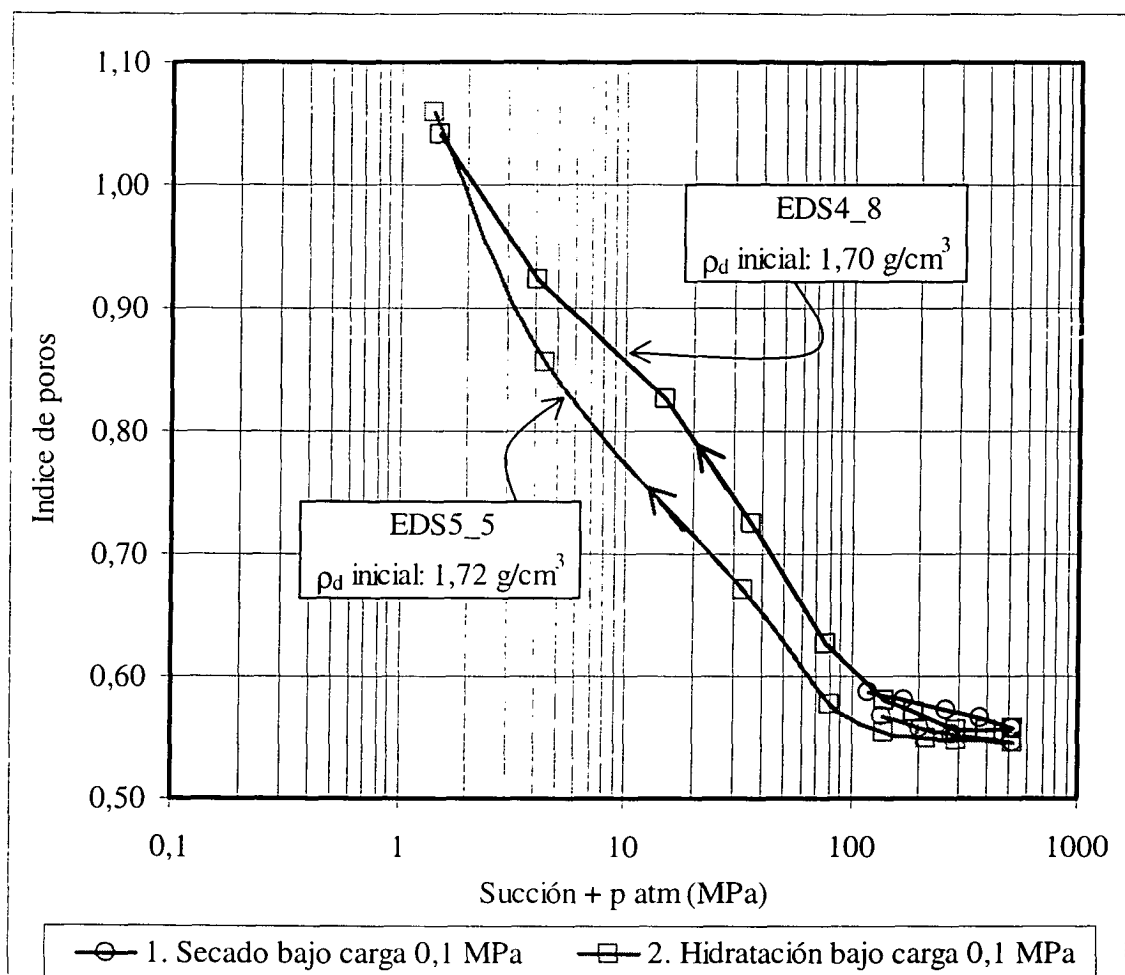


Figura 140: Evolución del índice de poros durante el secado y humectación de la bentonita bajo carga 0,1 MPa en dos ensayos edométricos

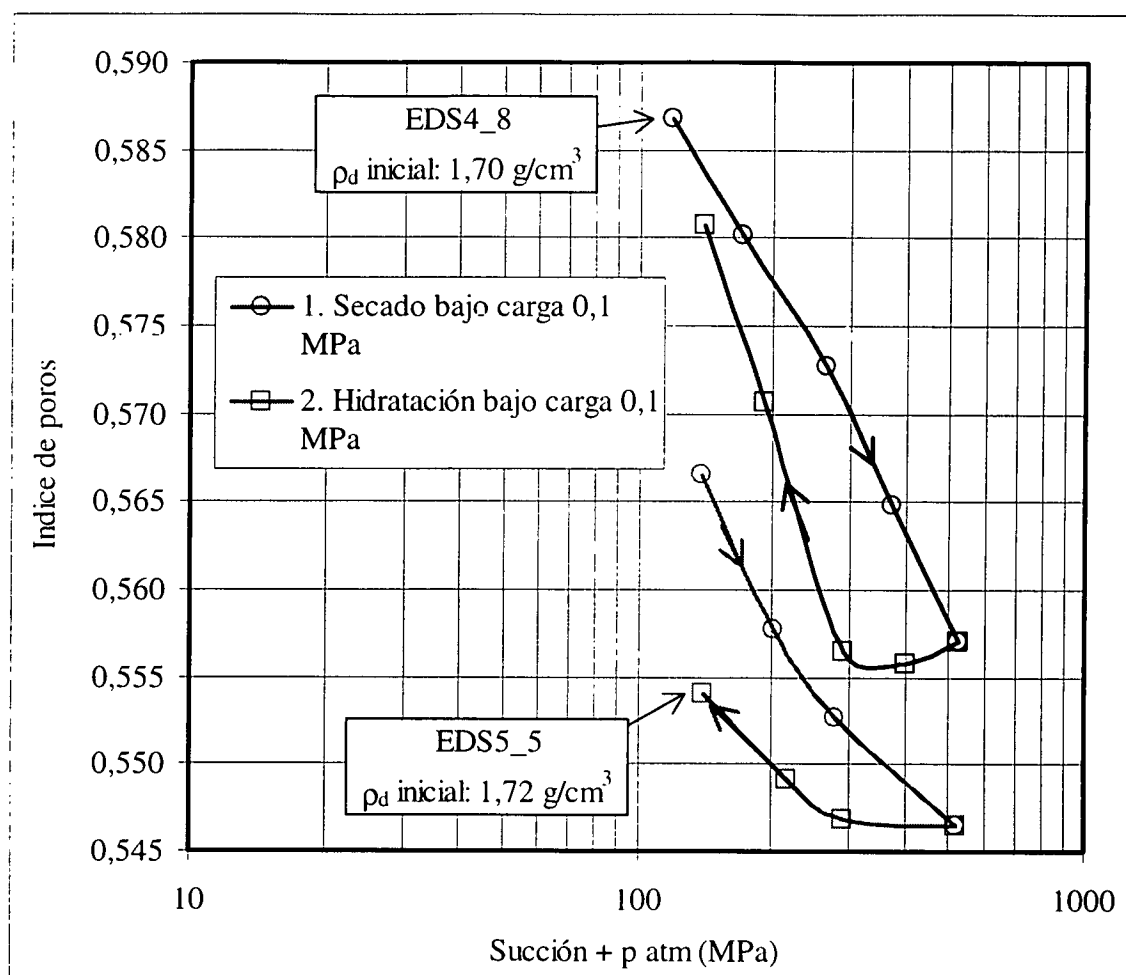


Figura 141: Detalle de la evolución de los índices de poros mostrada en la figura anterior para las succiones más altas

Trayectoria E4

El ensayo EDS2_8, que sigue la trayectoria E4, es un ensayo de presión de hinchamiento a succiones progresivamente menores para una muestra de densidad seca inicial 1,73 g/cm³ (Figura 142). Por las limitaciones del equipo no ha sido posible contrarrestar el hinchamiento en las succiones más bajas, inferiores a 14 MPa, por lo que la densidad final de los últimos escalones es menor que la inicial, y no ha sido posible determinar el valor de la presión de hinchamiento para la densidad seca inicial, sino sólo mantener la máxima carga. En el último escalón, se alcanza el equilibrio bajo una succión de 4,4 MPa con una carga de 9,5 MPa, quedando la muestra con una densidad seca de 1,70 g/cm³. La presión de hinchamiento de la muestra saturada a esta densidad, según el ajuste mostrado en la

sección “Presión de hinchamiento”, es de 11,5 MPa. Por tanto, el valor obtenido en este ensayo es inferior al teórico, pero dentro del rango posible de variación (25 %, sección “Presión de hinchamiento”).

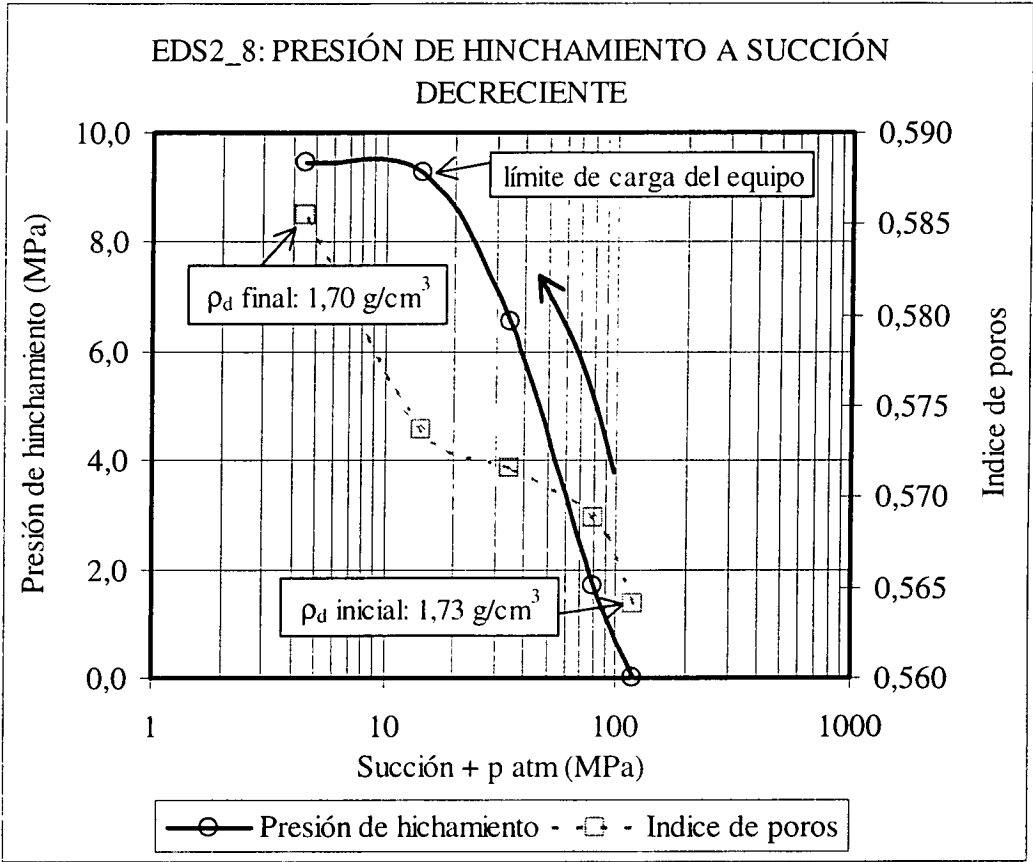


Figura 142: Valores de presión de hinchamiento al disminuir la succión en el ensayo EDS2_8

Trayectoria E5

La trayectoria E5 consiste en la estabilización de la muestra a la succión correspondiente a su humedad de equilibrio (134 MPa) bajo una carga pequeña, y en el posterior aumento de la carga hasta el máximo valor permitido por el equipo, 9 MPa, manteniendo la misma succión (Figura 143, tramo 1). A continuación se disminuye la succión sin modificar el elevado valor de carga alcanzado (tramo 2), y una vez saturada la muestra, se descarga (tramo 3).

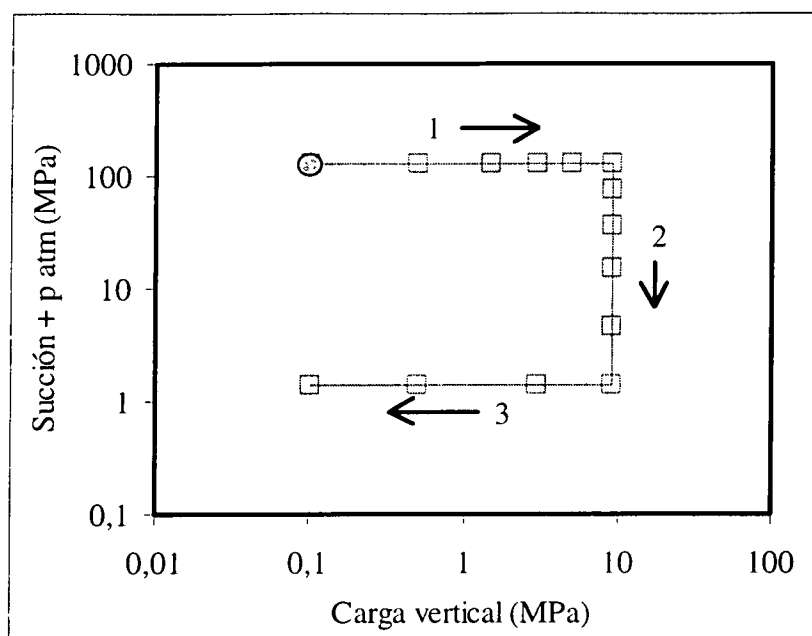


Figura 143: Trayectoria E5 en edómetro con control de succión mediante disoluciones: ensayo EDS1_10

Los índices de poros al final de los diferentes escalones de los tramos 1 y 2 de la trayectoria se muestran en la Figura 144. La Figura 145 muestra la evolución de la deformación en función del tiempo durante los sucesivos escalones del tramo de disminución de la succión bajo carga constante de la trayectoria (tramo 2). En ambas figuras se observa que, en el proceso de saturación de la muestra bajo carga 9 MPa, al disminuir la succión desde 15,3 a 5,4 MPa, la bentonita experimenta una pequeña disminución de volumen (“colapso”), que se recupera al producirse la saturación completa.

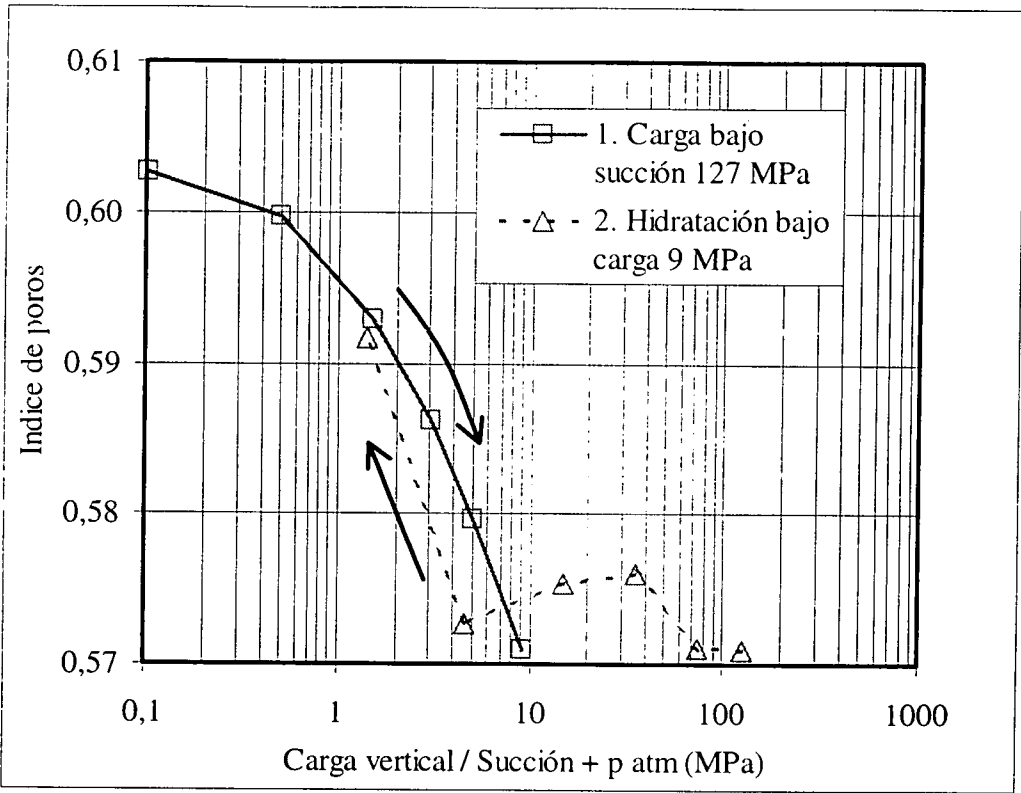


Figura 144: Índices de poros correspondientes a los diferentes escalones de carga y de posterior disminución de la succión en el ensayo EDS1_10

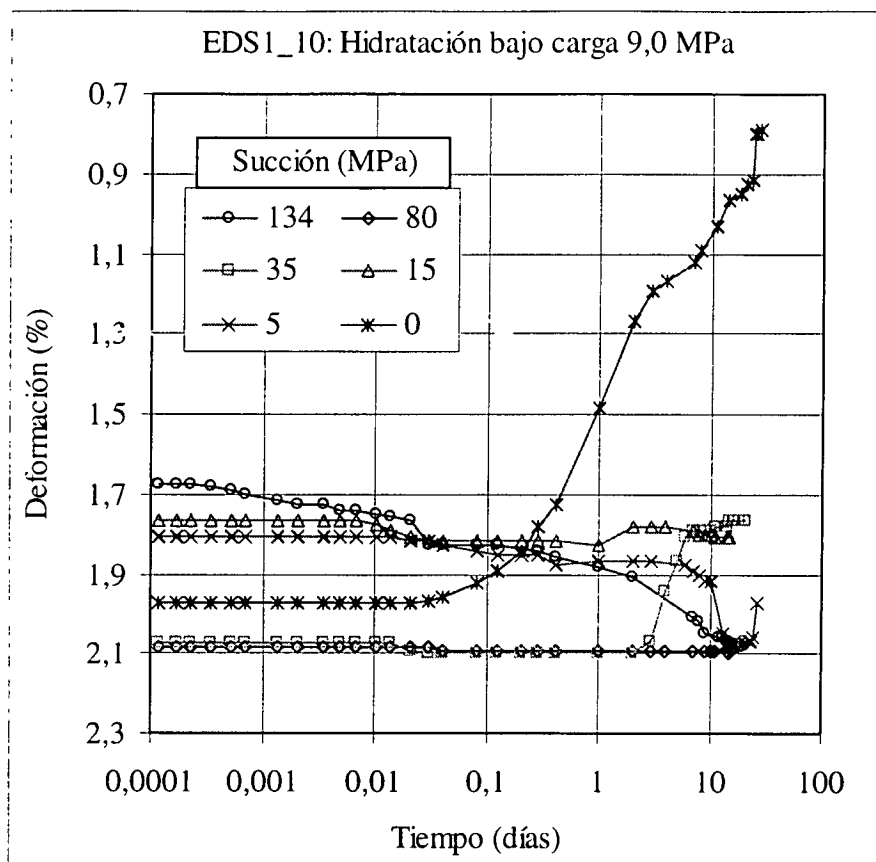


Figura 145: Evolución de la deformación durante los diferentes escalones del tramo de hidratación bajo carga de 9 MPa en el ensayo EDS1_10 (trayectoria E5)

Una vez alcanzada la saturación, se realiza una descarga escalonada, en la que el índice de poros aumenta de forma logarítmica (Figura 146).

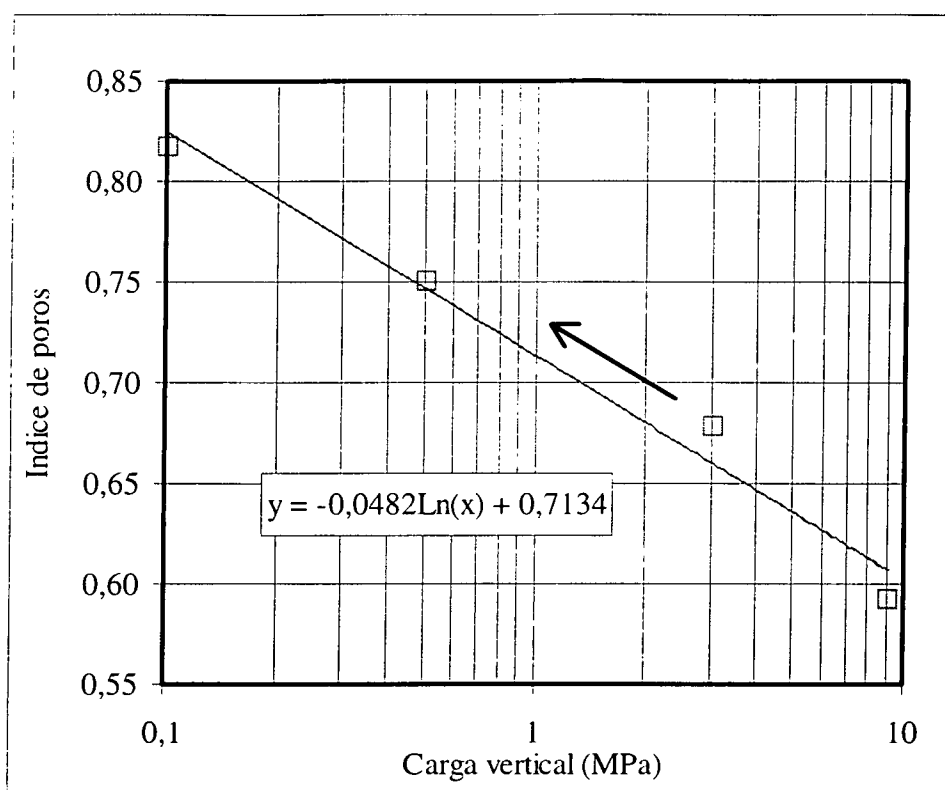


Figura 146: Valores finales de índice de poros de los escalones correspondientes a la trayectoria de descarga bajo succión 1,3 MPa en el ensayo EDS1_10

Trayectoria E6

Esta trayectoria consiste en disminuir la succión desde el valor inicial hasta un valor pequeño manteniendo una carga vertical baja (Figura 147, tramo 1). A continuación se carga la muestra bajo esta succión (tramo 2) y finalmente se descarga (tramo 3).

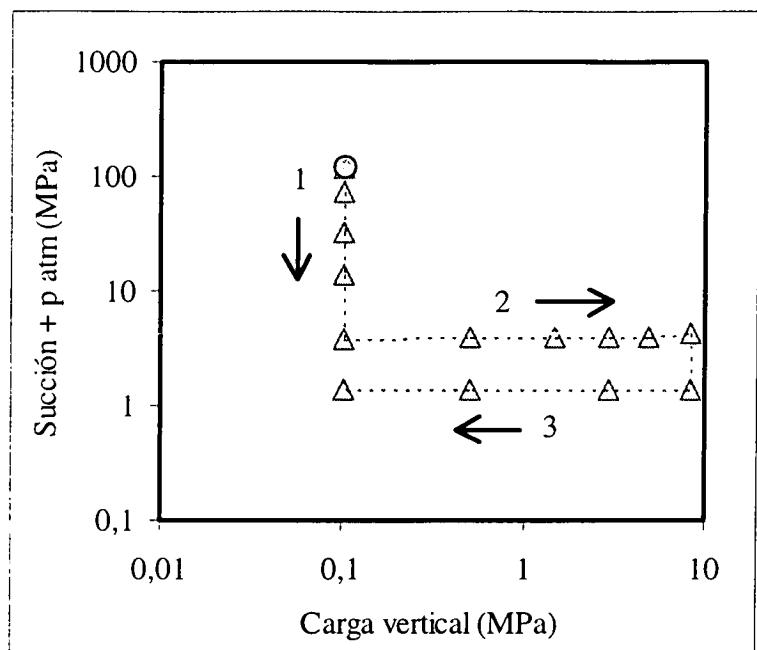


Figura 147: Trayectoria E6 en edómetro con control de succión mediante disoluciones: ensayo EDS2_9

Esta trayectoria se ha seguido en el ensayo EDS2_9. Se inicia con la estabilización de la muestra a la succión correspondiente a su humedad higroscópica (130 MPa) bajo una carga de 0,1 MPa y sigue con una rama inicial de hidratación hasta succión 4 MPa, manteniendo la misma carga vertical. Durante el proceso de hidratación la densidad seca de la muestra pasa de 1,71 a 1,47 g/cm³. Posteriormente se carga la muestra hasta 8,4 MPa, con lo que la densidad seca aumenta hasta 1,60 g/cm³. A continuación, se reduce la succión desde 4 hasta 1 MPa, tras lo cual se descarga la muestra de forma rápida y escalonada. La pequeña reducción de succión final no produce modificación apreciable del índice de poros, probablemente porque la muestra ya está completamente saturada para una succión de 4 MPa. Sin embargo, la descarga final en saturación produce una disminución de la densidad seca hasta un valor de 1,53 g/cm³. En la Figura 148 se muestra la evolución del índice de poros durante la hidratación inicial, la carga posterior y la descarga final, estando representados los sucesivos valores de succión y carga vertical en el mismo eje.

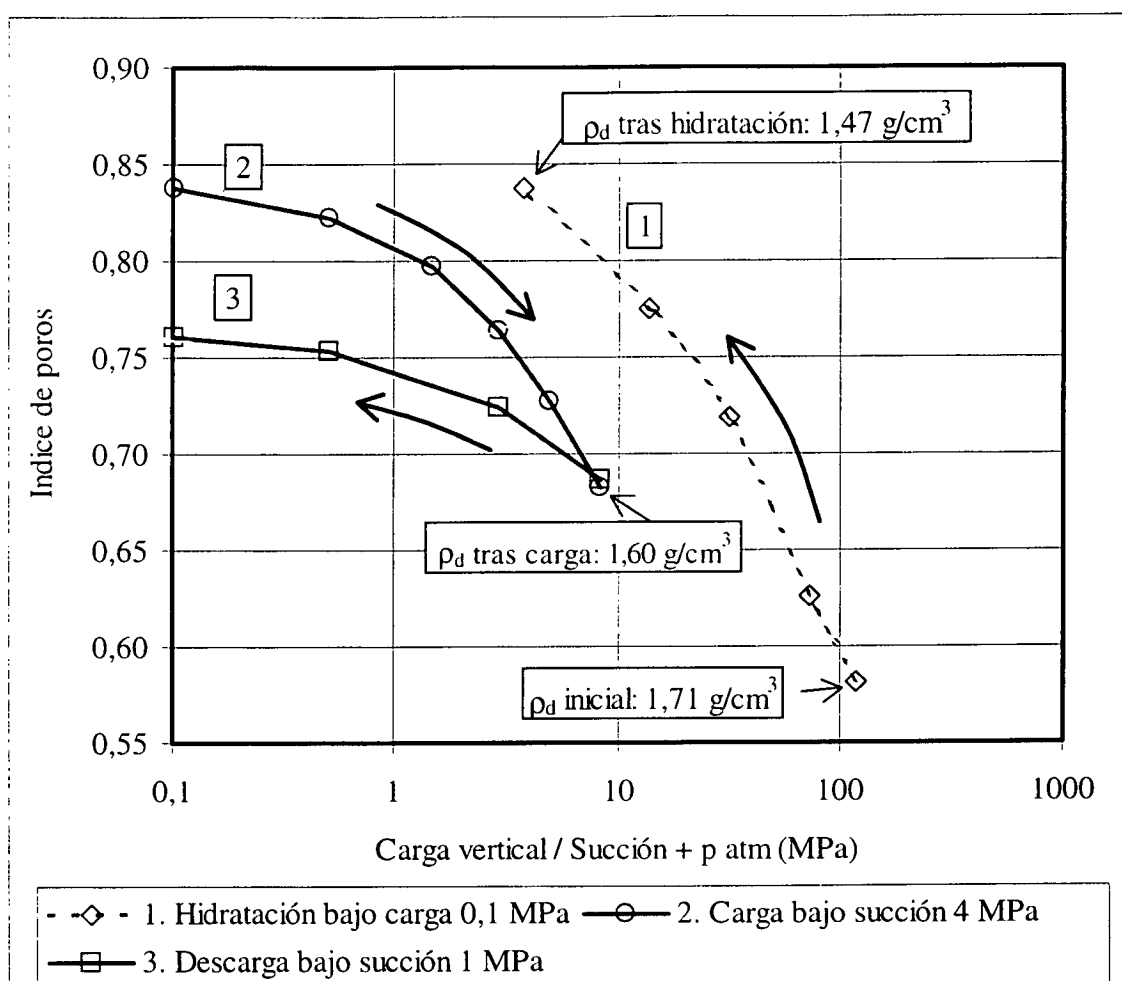


Figura 148: Evolución del índice de poros durante la hidratación y posterior carga y descarga de la muestra del ensayo EDS2_9

Edómetros con control de succión y temperatura

La trayectoria E2 de los edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno a 20 °C (ensayo EDN1_5) se ha realizado también a 40 °C (ensayo EDNC_10), a 60 °C (EDNC_11) y a 80 °C (EDNC_12). Además se ha realizado un ensayo de presión de hinchamiento a diferentes succiones y a temperatura de 40 °C (ensayo EDNC_9).

Las condiciones de humedad y temperatura a que se somete la muestra durante la realización de estos ensayos favorecen la proliferación de bacterias. Esto se ha comprobado mediante el estudio al microscopio electrónico de muestras sometidas a ensayos edométricos con succión controlada y su comparación con otras muestras de

bentonita FEBEX. Al igual que se ha observado en muestras de bentonita sometidas a tratamiento termo-hidráulico (es decir, a calentamiento e hidratación simultáneos), las muestras procedentes de estos ensayos edométricos presentan numerosas bacterias de diferentes tipos, según se muestra en la Figura 149 y Figura 150. Mingarro et al. (2000) hacen una estimación de entre 50.000 y 100.000 bacterias/g para las zonas más hidratadas de la bentonita sometida a tratamiento termo-hidráulico. La repercusión que este hecho pudiera tener en el comportamiento observado en la arcilla no ha podido ser discriminada.

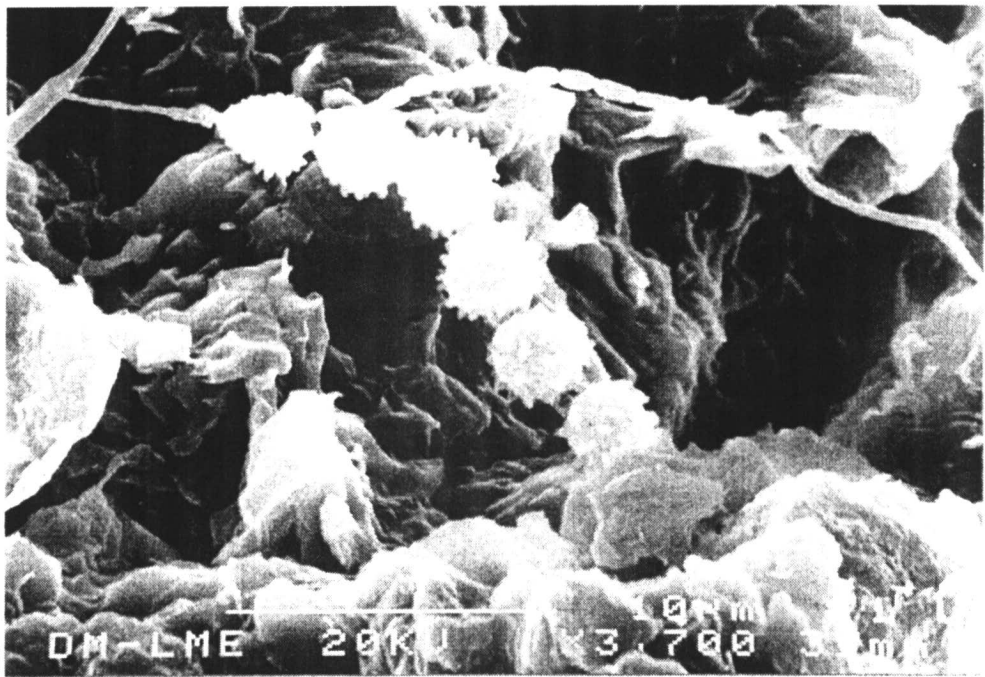


Figura 149: Imagen MEB a 3700 aumentos de una colonia de bacterias en una muestra sometida a un ensayo edométrico con control de succión y temperatura

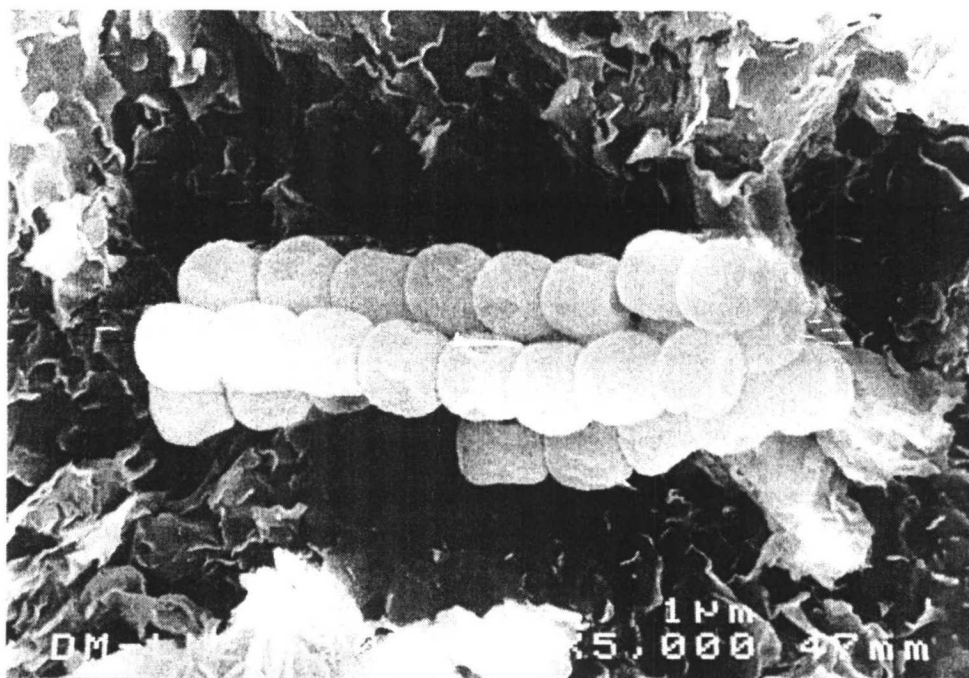


Figura 150: Imagen MEB a 5000 aumentos de una colonia de bacterias en una muestra sometida a un ensayo edométrico con control de succión y temperatura

Presión de hinchamiento

Se ha realizado un ensayo de presión de hinchamiento para diferentes succiones en edómetro con control de succión mediante presión de nitrógeno a temperatura de 40 °C, comenzando por succión de 0,5 MPa, después 5,0 MPa y finalmente, de nuevo, 0,5 MPa (EDNC_9). En el primer escalón no es posible contrarrestar la presión de hinchamiento, por lo que la densidad seca disminuye desde el valor inicial de 1,70 g/cm³ hasta 1,63 g/cm³. En la Tabla XLVI se incluyen los valores obtenidos junto con los valores teóricos de presión de hinchamiento correspondientes a cada densidad seca calculados con el ajuste obtenido para muestra saturada a temperatura de laboratorio (*cf.* sección “Presión de hinchamiento”). La presión de hinchamiento obtenida a 40 °C para succión 0,5 MPa es algo mayor que la obtenida a 20 °C para muestra saturada, aunque esta diferencia disminuye después de someter la muestra a cierto secado (escalón 3). Sin embargo, la presión de hinchamiento bajo succión de 5,0 MPa a 40 °C es igual que la de la muestra saturada a temperatura ambiente. El hecho de que ambas presiones de hinchamiento sean similares hace pensar en un incremento de la capacidad de hinchamiento de la bentonita para esta temperatura, ya que la presión de hinchamiento debería disminuir al aumentar la

succión, puesto que desciende el grado de saturación. En cualquier caso no parece que el efecto de la temperatura sea relevante, puesto que todos los valores obtenidos están en el rango de variación experimental.

Tabla XLVI: Ensayo de presión de hinchamiento con succión controlada a 40 °C

Escalón	Succión (MPa)	ρ_d final (g/cm ³)	P _s 40 °C (MPa)	P _s teórica a 20 °C (MPa)
	130	1,70		
1	0,5	1,63	8,4	7,1
2	5,0	1,65	8,1	8,1
3	0,5	1,64	8,1	7,9

Trayectoria E2

Se ha realizado un edómetro con control de succión mediante presión de nitrógeno a 40 °C (EDNC_10), uno a 60 °C (EDNC_11) y otro a 80 °C (EDNC_12), con pastillas compactadas a densidad seca nominal de 1,70 g/cm³ siguiendo la trayectoria E2 (Figura 151). El mismo tipo de ensayo se ha realizado también a 20 °C (EDN1_5).

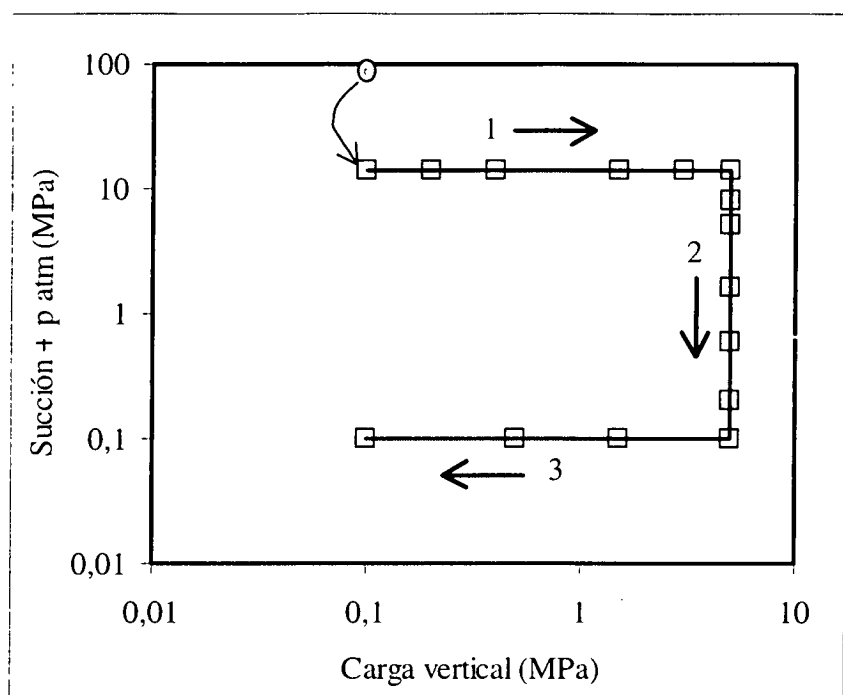


Figura 151: Trayectoria E2 en edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno, realizada a diferentes temperaturas

La primera parte del ensayo consiste en cargar la muestra manteniendo la máxima succión posible en el aparato (14 MPa). La muestra ensayada a 20 °C pasa, en el primer escalón bajo carga 0,1 MPa, de densidad seca 1,72 a 1,50 g/cm³, la muestra ensayada a 40 °C de 1,70 a 1,56 g/cm³, la ensayada a 60 °C de 1,69 a 1,57 g/cm³, y la ensayada a 80 °C de 1,69 a 1,55 g/cm³. Es decir, el hinchamiento que se produce inicialmente al disminuir la succión de los 130 MPa correspondientes a las condiciones iniciales de la arcilla, a los 14 MPa del edómetro, es mayor en el ensayo a temperatura ambiente, como se aprecia en la Figura 152. En la Figura 153 se muestra la evolución del índice de poros durante la carga para los ensayos realizados a las diferentes temperaturas. Durante la carga, es menor la reducción de índice de poros experimentada por la muestra ensayada a mayor temperatura, lo que es debido a que su densidad seca es mayor porque hinchó menos durante el primer escalón, lo que a su vez puede deberse a que la temperatura ha inducido un aumento de la presión de preconsolidación.

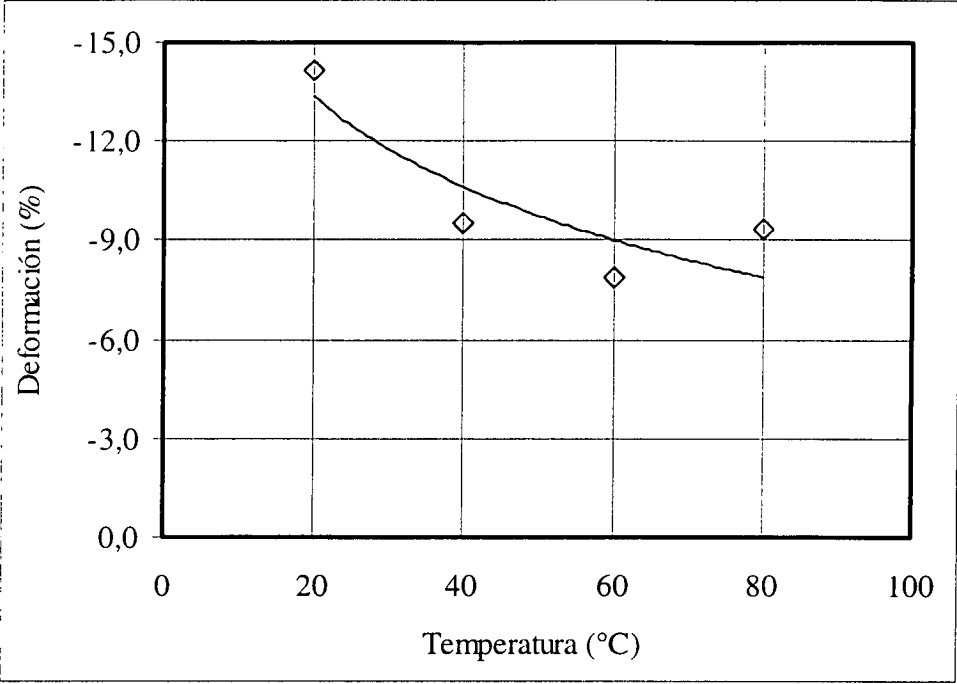


Figura 152: Deformación al pasar la succión de 130 a 14 MPa bajo carga 0,1 MPa en ensayos realizados a diferente temperatura

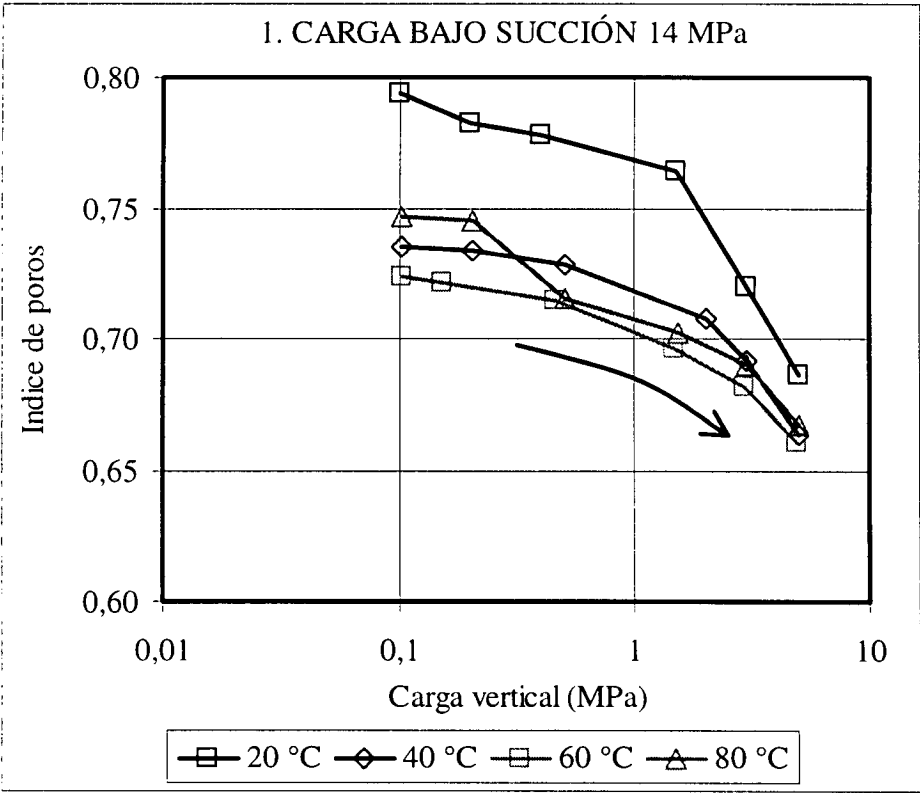


Figura 153: Evolución del índice de poros durante la carga bajo succión 14 MPa en ensayos realizados a diferente temperatura siguiendo la trayectoria E2 (tramo 1)

Una vez alcanzada la máxima carga posible (5 MPa), se hidrata la muestra por reducción progresiva de la succión hasta 0 MPa. Las curvas de evolución del índice de poros durante la hidratación se muestran en la Figura 154. Las muestras sometidas a mayor temperatura experimentan menor hinchamiento, especialmente para las succiones más altas, aunque en ningún caso el aumento del índice de poros es importante, puesto que el grado de saturación no aumenta mucho en el intervalo de succión de 14 a 0 MPa (*cf.* sección “Curva de retención a volumen constante”) y además el hinchamiento de la microestructura que pudiera producirse puede verse contrarrestado por el colapso de la macroestructura. El efecto del aumento de la presión de preconsolidación con la temperatura también contribuiría al menor hinchamiento durante la hidratación de las muestras calentadas. No hay diferencias significativas entre los resultados obtenidos en el ensayo a 40 y a 60 °C, excepto que la muestra ensayada a 60 °C sufre cierto colapso al disminuir la succión de 14 a 8 MPa, que se recupera al seguir disminuyendo la succión. Sin embargo, la muestra ensayada a 80 °C experimenta mayor hinchamiento al disminuir la succión que las ensayadas a 40 y 60 °C.

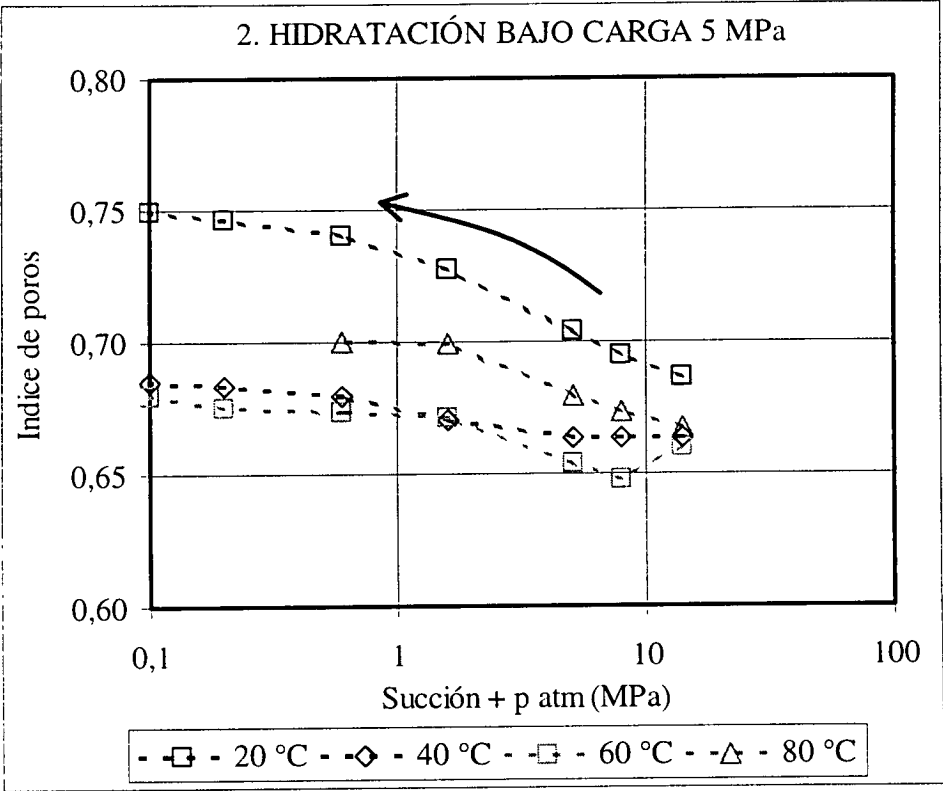


Figura 154: Evolución del índice de poros durante la hidratación bajo carga 5 MPa en ensayos realizados a diferente temperatura siguiendo la trayectoria E2 (tramo 2)

Los ensayos concluyen con la descarga escalonada de la muestra una vez saturada. El ensayo a 80 °C (EDNC_12) tuvo que ser interrumpido por avería antes de llegar a esta fase. La recuperación del índice de poros durante la descarga es mayor en los ensayos realizados a mayor temperatura, según se muestra en la Figura 155: en el ensayo realizado a 20 °C el índice de poros aumenta un 26 % durante la descarga, en el realizado a 40 °C, un 34 % y en el realizado a 60 °C, un 38 %, lo que puede ser debido simplemente a que la densidad seca de las muestras sometidas a mayor temperatura es mayor al inicio de la descarga. Como se viene observando, la recuperación del índice de poros durante una descarga rápida se produce según una relación logarítmica con la carga (Figura 155).

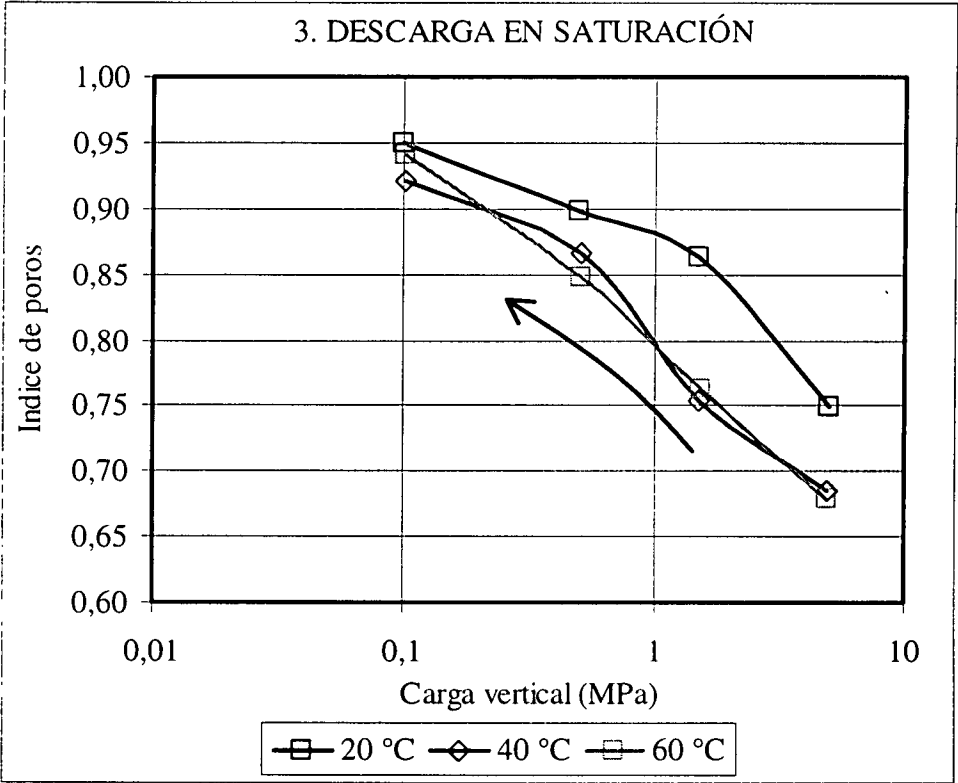


Figura 155: Evolución del índice de poros durante la descarga en saturación de ensayos realizados a diferente temperatura siguiendo la trayectoria E2 (tramo 3)

Por tanto, la temperatura parece inducir una rigidificación del material, que hincha menos durante la saturación, con lo que se produce un aumento de la densidad seca y de la presión de preconsolidación, por lo que se consolida menos durante la carga posterior.

Análisis de resultados

Trayectorias de secado

El secado de la muestra por reducción de la succión hasta valores próximos a 500 MPa (Trayectorias E1/1, E1/2, E2 y E3) no conlleva prácticamente disminución de volumen, según se aprecia en la Figura 156, en la que se ha representado la evolución del índice de poros durante el secado bajo una carga de 0,1 MPa para los diferentes ensayos. En todos ellos el índice de poros (e) disminuye al aumentar la succión (s , MPa) según una relación logarítmica, para la que se puede ajustar la siguiente ecuación en función de la densidad seca inicial (ρ_d , g/cm³):

$$e = (0,16 \rho_d - 0,29) \ln s + (-1,68 \rho_d + 3,53)$$

Las líneas mostradas en la Figura 156, cuya pendiente es casi independiente de la densidad seca inicial, están obtenidas con esta ecuación.

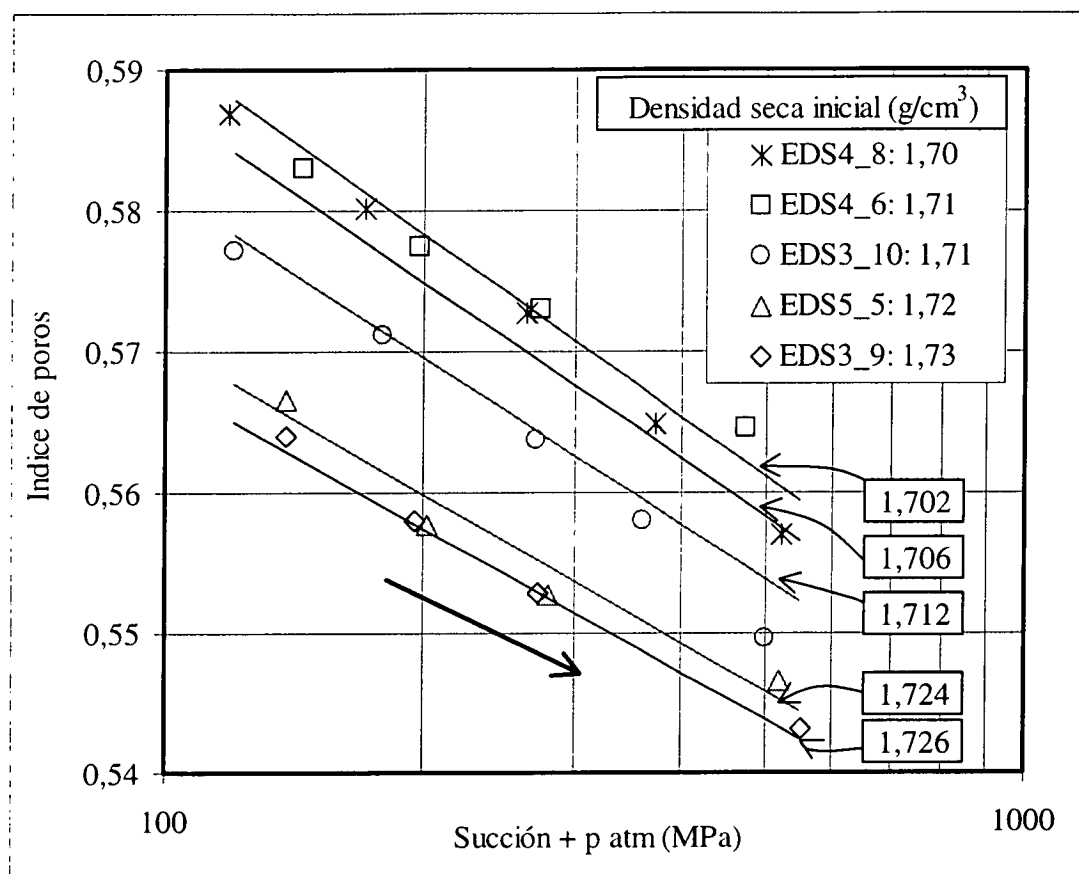


Figura 156: Evolución del índice de poros durante el secado bajo carga vertical 0,1 MPa en diferentes ensayos (las densidades secas iniciales se indican en g/cm^3)

Esta pequeña variación de volumen con el secado a partir de 120 MPa parece indicar que este valor de succión debe de estar por encima del punto de entrada de aire, es decir, del valor a partir del que la pérdida de volumen de agua debida al secado es compensada por la entrada de un volumen de aire semejante, con lo que la pérdida de humedad no se traduce en pérdida de porosidad total. Para el punto de entrada de aire en montmorillonita se han propuesto valores de 100 MPa (Tessier et al. 1992).

Una vez concluido el secado, al volver a disminuir la succión hasta al valor inicial de 130 MPa, la densidad seca inicial se recupera casi prácticamente, según se comprueba en la Figura 157. Sin embargo, existe un intervalo de succión, aproximadamente entre 500 y 300 MPa, en el que las deformaciones durante la hidratación son muy pequeñas. Esto puede ser debido a que el secado ha plastificado el material, con lo que el intervalo elástico se ha movido. El intervalo elástico estaría ahora comprendido aproximadamente entre 500 y 300

MPa, cuando antes del secado estaría por debajo de los 130 MPa iniciales. Por encima de estos valores, la disminución de succión sí produce un incremento notable de volumen.

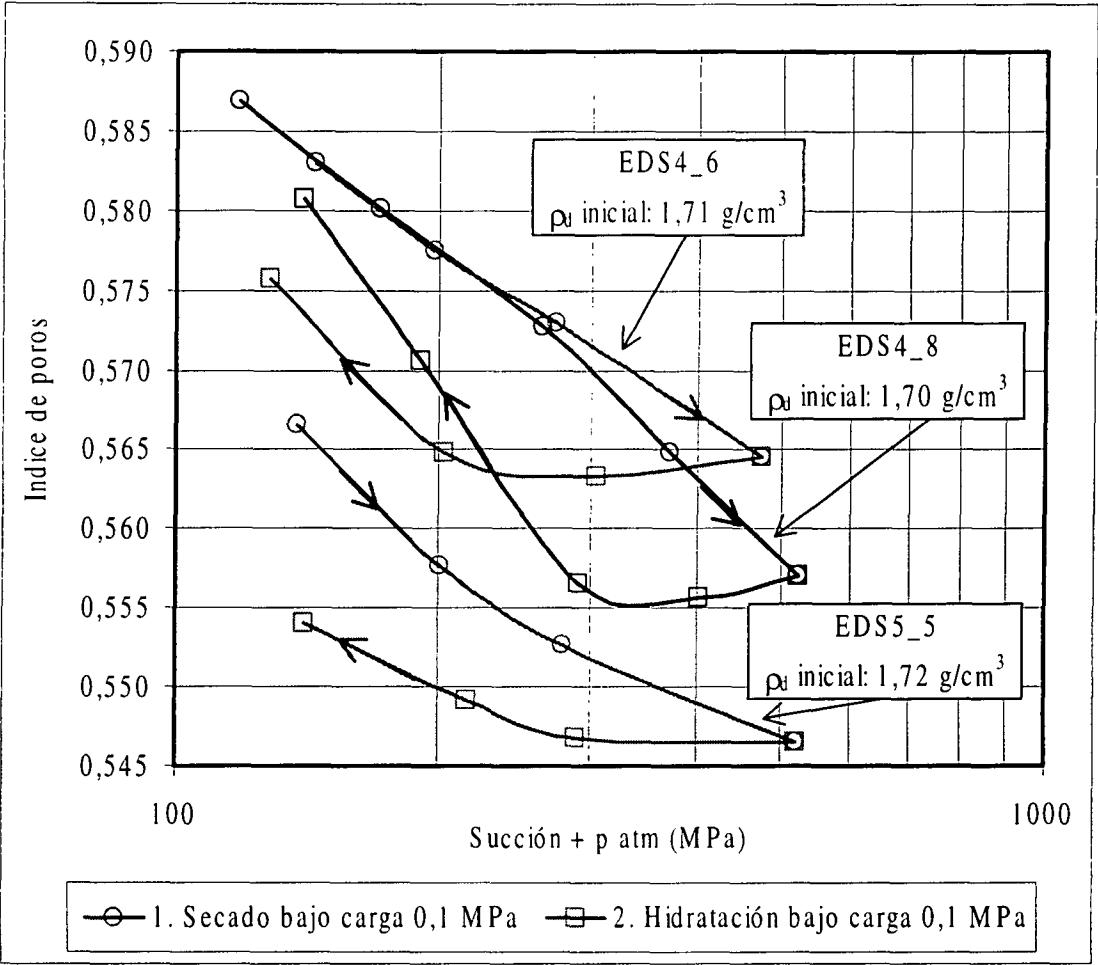


Figura 157: Evolución del índice de poros durante el secado e hidratación bajo carga 0,1 MPa en diferentes ensayos edométricos

Además, la comparación de la evolución del índice de poros durante la hidratación bajo una carga pequeña experimentada en los ensayos EDS2_9, EDS4_8 y EDS5_5, indica que el secado no parece modificar la capacidad de hinchamiento de la muestra durante la hidratación posterior, debido a lo reducido de las deformaciones aplicadas por el ciclo de secado/humectación. En los ensayos EDS4_8 y EDS5_5 la hidratación se produce tras un secado intenso hasta succión de 520 MPa, que no tuvo lugar en el caso del ensayo EDS2_9. La Figura 158 representa los índices de poros de la trayectoria de hidratación del ensayo EDS2_9 y del tramo de la trayectoria de hidratación tras secado de los ensayos EDS4_8 y EDS5_5. La densidad seca para una succión aproximada de 130 MPa es de 1,71

g/cm³ para los ensayos EDS2_9 y EDS4_8, y de 1,74 g/cm³ para el ensayo EDS5_5. Sin embargo, la densidad seca tras hidratación hasta una succión de 4 MPa, es inferior para los ensayos EDS4_8 y EDS5_5 –que habían experimentado un secado previo muy intenso (Figura 156)–, que para el ensayo EDS2_9. Se observa además que en las muestras sometidas a secado hay un cambio de pendiente muy marcado cuando la succión se reduce por debajo de la succión inicial. Los modelos de comportamiento microestructural señalan que el hinchamiento experimentado por un suelo al disminuir la succión bajo determinada carga es mayor cuanto mayor es la succión al inicio de la hidratación, y que la relación entre el porcentaje de deformación y el decremento de succión aumenta al llegar a los valores más bajos de succión, aspectos ambos que se han visto confirmados en estos ensayos.

Este ligero mayor hinchamiento de muestras que han sufrido un secado previo se observó también en las curvas de retención a volumen libre, en las que las densidades alcanzadas en las trayectorias de humectación tras secado son algo menores que las alcanzadas en trayectorias de humectación (*cf.* sección “Curva de retención a volumen libre”). Quizá, como se observó en los ciclos de secado /humectación sobre muestra granulada (sección “Límites de Atterberg, superficie específica y granulometría”), el secado produce cierta desagregación de las partículas primarias y un aumento de superficies libres con capacidad de absorber agua y, por lo tanto, hinchar. Como veremos más adelante, tampoco los valores de presión de hinchamiento parecen reducirse tras el secado.

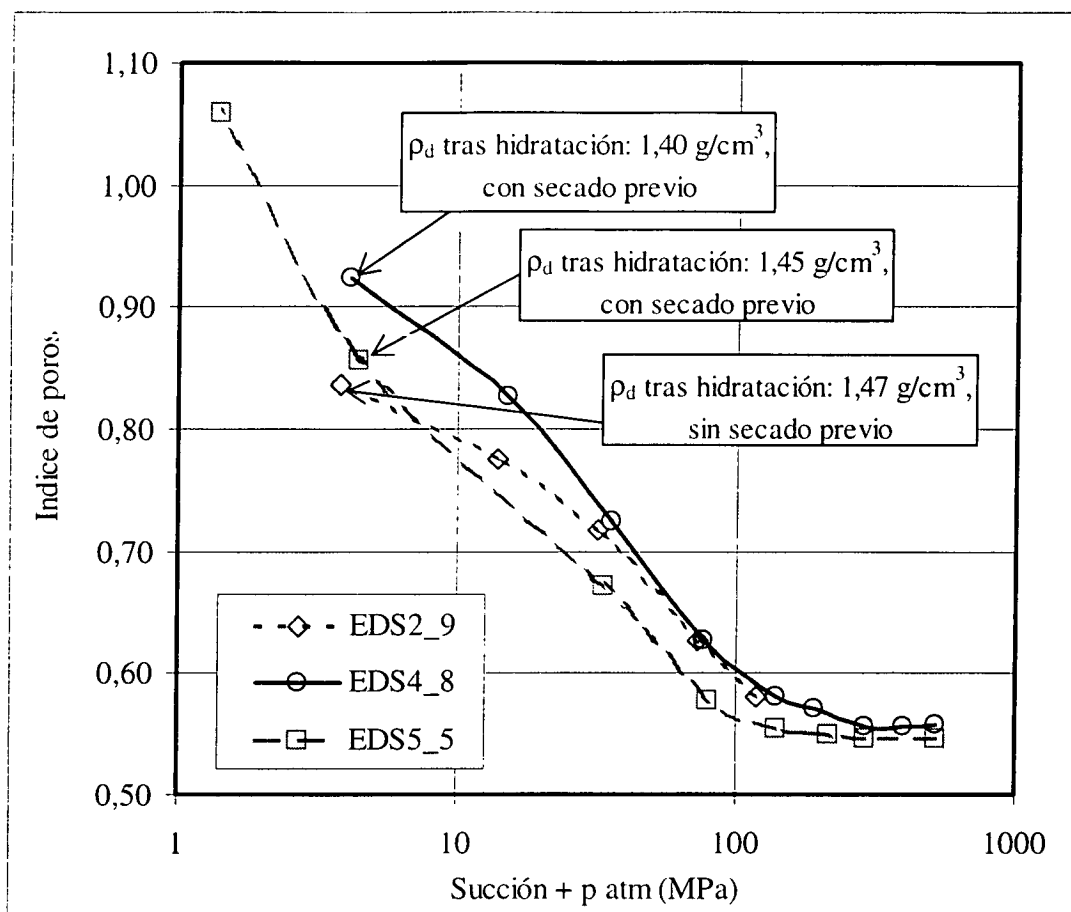


Figura 158: Comparación de la evolución del índice de poros durante la hidratación bajo carga 0,1 MPa en tres ensayos edométricos, dos de los cuales ha sufrido previamente un secado hasta succión de 520 MPa

Por otra parte, para succiones superiores a 120 MPa, la carga externa no produce tampoco una consolidación importante de la muestra, que se hace rígida, como queda patente en el hecho de que la disminución del índice de poros inducida por la carga desde 0,1 hasta 5 MPa bajo succión de 520 MPa en el ensayo EDS3_9 (trayectoria E2), es análoga a la que se produce en el ensayo EDS1_10 bajo succión de 130 MPa (trayectoria E5), e igual a un 4 %.

Influencia de la trayectoria

La variedad de ensayos realizados ha permitido poner de manifiesto la repercusión que el tipo de trayectoria tiene sobre el valor final de la deformación, así como sobre la reversibilidad de ésta. Muestras con situaciones de partida análogas, que llegan a

condiciones finales de succión y carga semejantes, pero a través de situaciones tensionales diferentes, tienen un comportamiento deformacional bien distinto. En esta sección se comparan los resultados de parejas de ensayos realizados siguiendo trayectorias que tienen inicio y final –o bien algún punto intermedio– comunes. Para mayor claridad, en la misma figura en la que se presentan los resultados, se incluyen las trayectorias –o tramos de trayectoria–, que se comparan.

Así por ejemplo, las trayectorias E2 (ensayo EDN1_5) y E3 (ensayo EDN4_7) parten de la muestra en las mismas condiciones: succión 14 MPa y carga vertical 0,1 MPa. En la trayectoria E2 la muestra se carga progresivamente hasta 5 MPa y a continuación se hidrata por disminución de la succión bajo esta carga elevada (Figura 110). Sin embargo, en la trayectoria E3 la muestra se carga inicialmente sólo hasta un pequeño valor (0,5 MPa), bajo el cual se produce la hidratación. Al llegar al mínimo valor de succión, 0,1 MPa, se termina de cargar la muestra hasta 5 MPa (Figura 115). Por lo tanto, en este punto, las condiciones de ambos ensayos son las mismas: succión 0,1 MPa y carga 5 MPa. Sin embargo, los índices de poros son muy diferentes, como se demuestra en la Figura 159, que pone de manifiesto la importancia de la trayectoria seguida en el valor final de la deformación.

En la trayectoria de carga del ensayo EDN1_5 se produce un cambio de pendiente que parece corresponder a la “presión de presconsolidación”, cuyo valor ha debido disminuir durante la hidratación que se produce al colocar la muestra en el edómetro bajo carga y succión bajas en el primer escalón, debido al aumento de volumen asociado a la disminución de succión. A partir de este valor se producirían deformaciones de reducción de volumen irreversibles. Por otra parte, la deformación microestructural al hidratar es mayor cuanto menor es la carga aplicada. El efecto de aumento de la deformabilidad bajo carga en la muestra más saturada (ensayo EDN4_7) no llega a compensar la mayor expansión, consecuencia de la hidratación bajo una carga pequeña, que se produjo previamente. De esta manera, en el ensayo EDN4_7 se produce un aumento del índice de poros que la carga posterior no es capaz de contrarrestar.

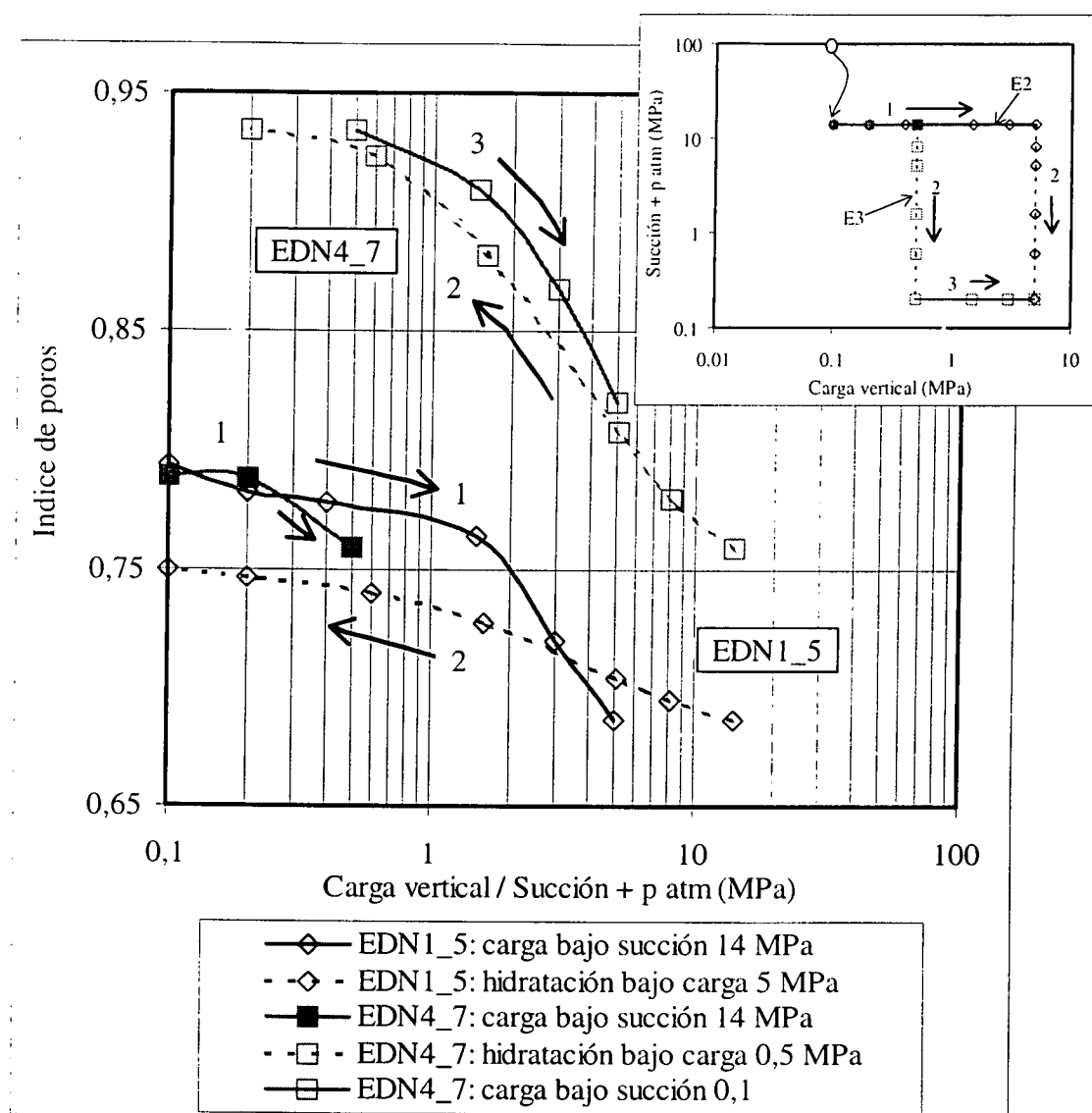


Figura 159: Comparación de los índices de poros al final de cada escalón de las trayectorias E2 (ensayo EDN1_5) y E3 (ensayo EDN4_7) realizadas en edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno

En los ensayos con control de succión mediante presión de nitrógeno también tiene influencia sobre la deformación final la secuencia de aplicación de cargas previa a la saturación. Esto se comprueba al comparar las trayectorias E2 y E4/1, en las que se produce la hidratación de la muestra por disminución de la succión desde 14 MPa bajo carga vertical de 5 MPa. En la trayectoria E2 (ensayo EDN1_5) la carga de la muestra previa a la hidratación se realiza de forma escalonada, lo que permite que, en el primer escalón, se produzca un aumento importante del índice de poros (Figura 112), debido a que, para la máxima succión que se puede aplicar en estos edómetros (14 MPa), la

bentonita tiene una elevada capacidad de tomar agua, máxime si no está cargada. Sin embargo, en la trayectoria E4/1 (ensayos EDN2_10 y EDN4_6), toda la carga se aplica al comienzo del ensayo, lo que restringe la disminución de densidad inicial. Esta diferencia inicial en la forma de aplicar la carga repercute en el comportamiento del material durante la hidratación subsecuente, según se aprecia en la Figura 160. En el ensayo que sigue la trayectoria E2 la muestra tiene un índice de poros al comienzo de la hidratación mayor que en los ensayos de la trayectoria E4/1 y, además, el incremento de índice de poros que se produce durante ésta es también mayor.

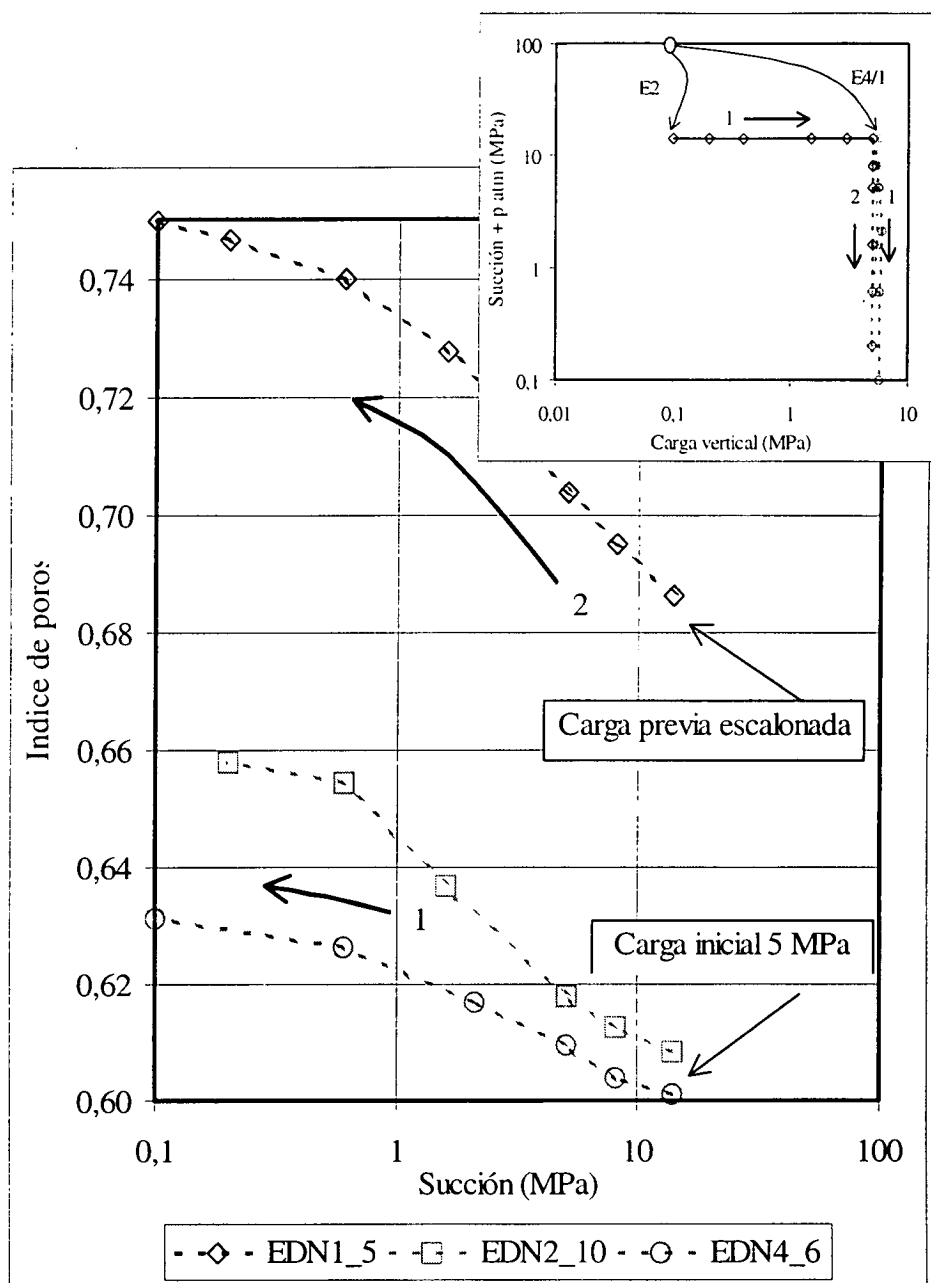


Figura 160: Evolución del índice de poros durante el tramo de hidratación bajo carga 5 MPa de las trayectorias E2 (ensayo EDN1_5) y E4/1 (ensayos EDN2_10 y EDN4_6)

La influencia de la magnitud de la carga vertical durante la hidratación sobre el comportamiento deformacional de la muestra es todavía más patente si se comparan resultados de ensayos realizados en edómetros con control de la succión mediante disoluciones de ácido sulfúrico. Por ejemplo, las trayectorias E5 y E6 empiezan y terminan en los mismos valores de carga y succión, pero, mientras que en la primera la muestra se carga antes de hidratarse, en la trayectoria E6 la hidratación es anterior a la carga. Esto se

traduce en una gran diferencia en los índices de poros finales de ambos ensayos, como se muestra en la Figura 161. La carga del ensayo EDS1_10 (trayectoria E5, tramo 1) se produce sobre la muestra con su humedad higroscópica, ya que la succión aplicada corresponde al valor de la humedad relativa en el laboratorio (130 MPa), por lo que la muestra no está saturada (la densidad seca máxima que llega a alcanzarse durante la carga es de $1,72 \text{ g/cm}^3$, que para una humedad del 14 % –suponiendo que la humedad se mantiene igual a la inicial–, corresponde a un grado de saturación de 66 %). Además, la muestra está sobreconsolidada, por lo que la densidad seca sólo aumenta de 1,68 a $1,72 \text{ g/cm}^3$. Durante la hidratación posterior tampoco se produce un aumento significativo del índice de poros, ya que la disminución de la succión tiene lugar bajo una carga vertical muy alta con relación a la presión de hinchamiento (9 MPa, frente a un valor de presión de hinchamiento de 13 MPa para densidad seca $1,72 \text{ g/cm}^3$, según el ajuste de la sección “Presión de hinchamiento”), por lo que el valor final de la densidad seca queda mayor que al principio del ensayo. Sin embargo, en la trayectoria E6 (ensayo EDS2_9) la hidratación se produce bajo una carga muy baja, 0,1 MPa, lo que permite que la muestra expanda hasta llegar a una densidad seca de $1,47 \text{ g/cm}^3$. La carga posterior, que tiene lugar bajo una succión de 4 MPa, se produce sobre la muestra saturada (*cf.* sección “Curva de retención a volumen constante”), y sí origina una consolidación importante –puesto que la densidad seca es menor que en el otro ensayo y la presión de preconsolidación ha debido disminuir durante la hidratación previa–, aunque sin ser suficiente como para que la densidad seca aumente hasta su valor inicial. Esto es debido a que la hidratación produce deformaciones irreversibles que son mayores cuanto menor es la carga aplicada.

empiezan con un aumento gradual de la succión hasta más de 500 MPa bajo carga 0,1 MPa. Pero en la trayectoria E2 (ensayo EDS3_9), después del secado se produce la carga de la muestra hasta 5 MPa, seguida de su hidratación progresiva hasta un valor de succión de 1 MPa; mientras que en la trayectoria E3 (ensayo EDS5_5), tras el secado la muestra se hidrata primero por disminución de la succión hasta 1 MPa y luego se produce su carga hasta 5 MPa (Figura 162). Análogamente a lo que se observó en la trayectoria E6, la hidratación de la muestra bajo una carga pequeña en la trayectoria E3, produce un incremento importante del índice de poros, que no es posible contrarrestar con la carga vertical posterior, por lo que el valor de la densidad seca queda en $1,54 \text{ g/cm}^3$. En la trayectoria E2 (ensayo EDS3_9), la carga de la muestra sometida a una succión importante, y por tanto con una humedad muy pequeña (inferior al 6 %, según las curvas de retención), apenas produce consolidación. De hecho, la consolidación inducida por la carga desde 0,1 hasta 5 MPa bajo succión de 520 MPa es de un 4 %, análoga a la que se produce en el ensayo EDS1_10 bajo succión de 130 MPa (trayectoria E5). La densidad seca al final del tramo de carga del ensayo EDS3_9 es de $1,77 \text{ g/cm}^3$, a la que correspondería una presión de hinchamiento de 18 MPa. Por tanto, la carga de 5 MPa bajo la que se produce la disminución de succión, está muy lejos del valor de la presión de hinchamiento para esta muestra, lo que permite que el índice de poros aumente bastante durante la hidratación. A pesar de ello, este aumento del índice de poros no es suficiente para igualar la densidad seca en las mismas condiciones finales del ensayo EDS5_5.

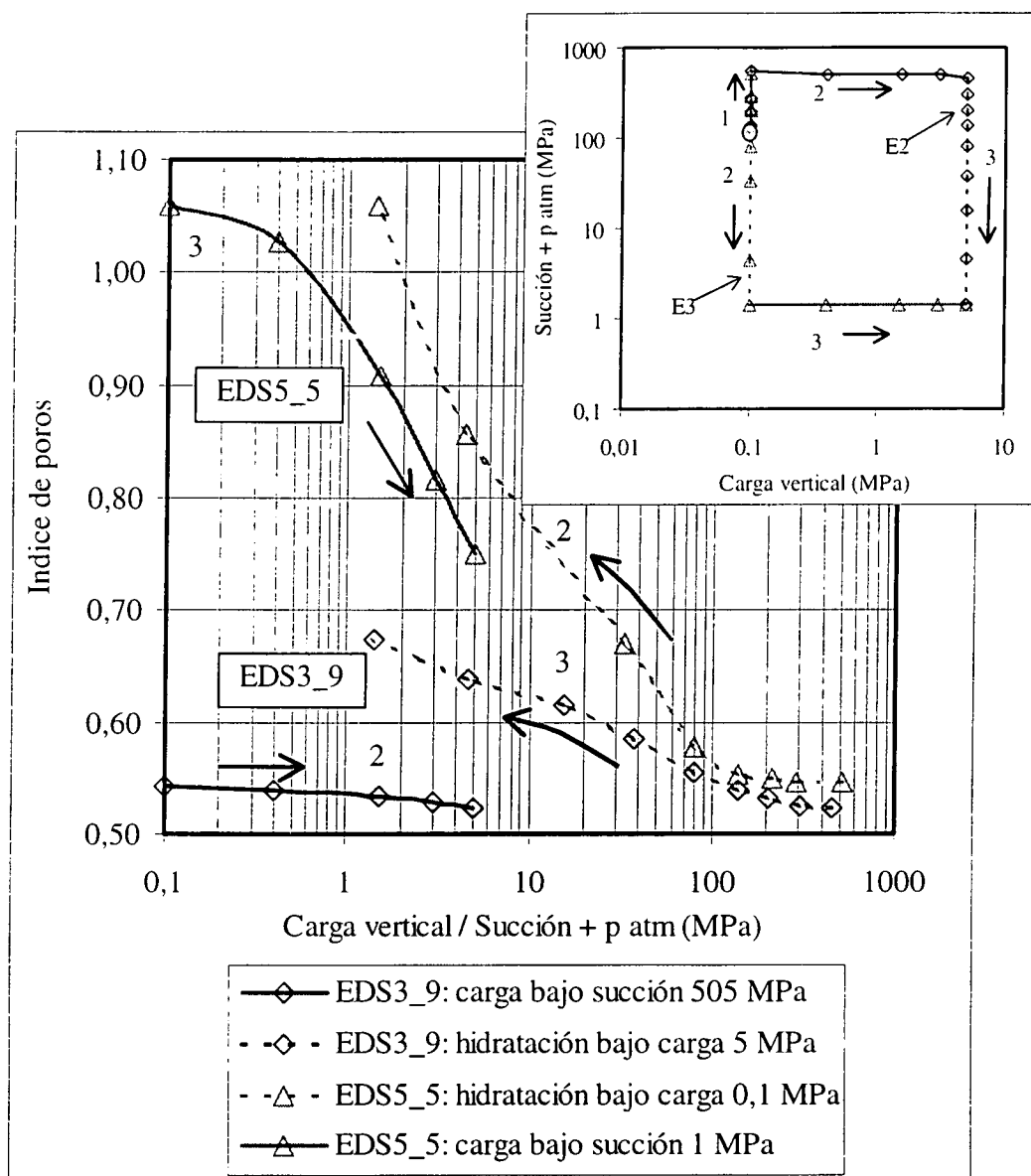


Figura 162: Comparación de los índices de poros al final de cada escalón de las trayectorias E2 (ensayo EDS3_9) y E3 (ensayo EDS5_5) (el secado inicial de ambos ensayos no está representado)

Por tanto, la diferencia entre los índices de poros finales de las trayectorias E2 (ensayo EDS3_9) y E3 (ensayo EDS5_5) no es tan grande como la que hay entre los índices de poros finales de las trayectorias E5 (ensayo EDS2_9) y E6 (ensayo EDS1_10). Esto es debido a que la hidratación en el ensayo EDS1_10 tiene lugar bajo carga 9 MPa, mientras que en el ensayo EDS3_9 tiene lugar bajo una carga inferior, 5 MPa. Además, la densidad seca al inicio de la hidratación en el ensayo EDS3_9 ($1,77 \text{ g/cm}^3$) es superior a la del ensayo EDS1_10 ($1,72 \text{ g/cm}^3$), debido al secado que tiene lugar al comienzo del primero de ellos. Ambas circunstancias, la mayor densidad seca y la menor carga bajo la que se

produce la hidratación (muy alejada del valor de presión de hinchamiento de la muestra), permiten una mayor recuperación del índice de poros en el ensayo EDS3_9, y contribuyen a que en este ensayo no se produzca el colapso que se observó en el ensayo EDS1_10. Otra diferencia fundamental entre los dos ensayos es la humedad que tiene la muestra cuando se inicia la hidratación, que debe de ser de alrededor del 6 % para el ensayo EDS3_9 y del 14 % para el ensayo EDS1_10 (*cf.* sección “Curva de retención”). La comparación entre los resultados de ambos ensayos se establece en la Figura 163. Se puede ver que para succiones altas la rigidez frente a cargas cambia poco.

El colapso observado en el ensayo EDS1_10 se puede explicar como consecuencia de las transferencias entre micro y macroestructura. Bajo una carga vertical de 9 MPa, sólo una cantidad limitada de agua puede entrar en la muestra durante la hidratación que, al principio, sólo afecta a la microestructura, debido a las altas succiones implicadas. Al disminuir la succión hasta 15 MPa, los mesoporos comienzan a verse afectados, y al saturarse se produce la pérdida de resistencia de la macroestructura y su colapso. Al alcanzarse la saturación total, la arcilla continúa hinchando, puesto que la interlámina tiene mayor disponibilidad de agua proveniente de los mesoporos (bajo carga de 9 MPa y succión inferior a 4 MPa, probablemente los macroporos han desaparecido).

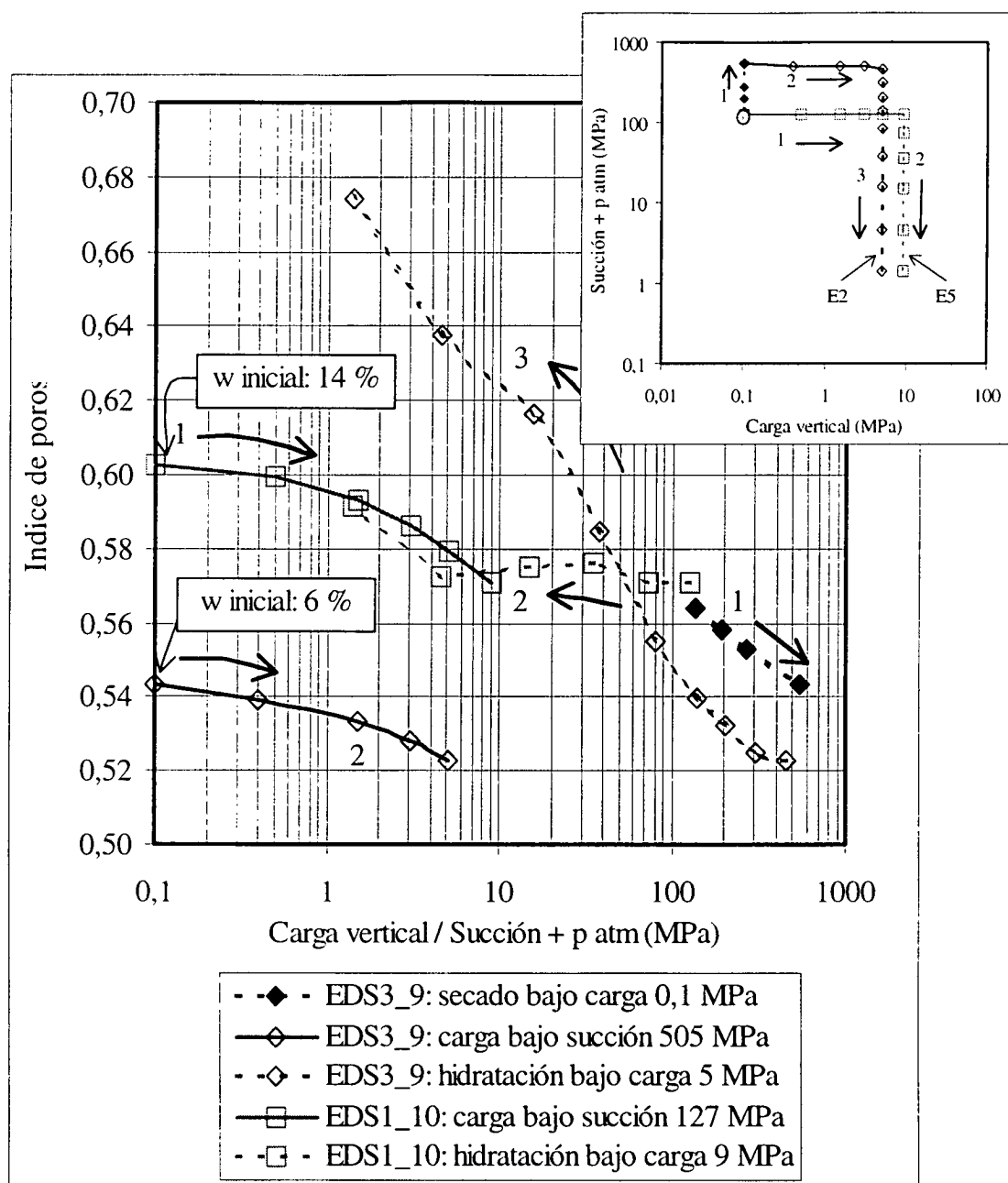


Figura 163: Comparación de los índices de poros al final de cada escalón de las trayectorias E2 (ensayo EDS3_9) y E5 (ensayo EDS1_10)

Lo que se ha expuesto en esta sección lleva a la conclusión de que, cuando la muestra se hidrata bajo una carga vertical baja (ensayos EDN4_7, EDN1_5, EDS2_9 y EDS5_5), el índice de poros aumenta mucho, y la carga vertical que se aplica posteriormente no puede contrarrestar este hinchamiento, a pesar de la disminución en la presión de preconsolidación. Sin embargo, si se impide el hinchamiento durante la saturación, cargando la muestra previamente o simultáneamente (ensayos EDS1_10, EDS3_9,

EDN1_5, EDN4_6 y EDN2_10), el cambio final de volumen es más pequeño. Este comportamiento es un ejemplo de la deformación macroscópica irreversible inducida por el hinchamiento microestructural, cuya magnitud depende de la trayectoria de esfuerzos, y concuerda con los resultados de Brackley (1975) y Justo et al. (1984).

Una constatación cuantitativa de este comportamiento se obtiene al comparar las pendientes de las rectas que –en escala semilogarítmica– relacionan el índice de poros con la succión (más presión atmosférica, en MPa) para trayectorias de hidratación bajo diferentes cargas (índice C_m de Fredlung & Rahardjo (1993), análogo al índice λ_s de Alonso et al. (1990)). El tramo lineal de esta relación está comprendido entre succiones de 0,5 y 140 MPa, puesto que para succiones inferiores a 0,5 MPa o superiores a 130 MPa, los cambios de volumen disminuyen de intensidad. La Tabla XLVII recoge los valores de esta pendiente para los diferentes ensayos, con indicación del intervalo de succión para el que la relación es lineal y del valor de la densidad seca al comienzo de la trayectoria. Se incluyen también las pendientes de la recta que relaciona índice de poros y succión (más presión atmosférica, en MPa) –en escala semilogarítmica– para las trayectorias de secado entre 120 y 520 MPa.

Tabla XLVII: Pendiente de la relación “índice de poros/log succión” para trayectorias de cambio de succión bajo carga constante

Ensayo	Carga (MPa)	Trayectoria (MPa)	ρ_d inicial (g/cm ³)	$\Delta e/\Delta \log s$
EDN1_5	5	14-0,5	1,57	-0,041
EDN3_10	9	14-0,5	1,59	-0,022
EDN5_6	10	14-0,5	1,55	-0,023
EDN4_7	0,5	14-0,5	1,51	-0,125
EDN4_6	5	14-0,5	1,71	-0,034
EDN2_10	5	14-0,5	1,71	-0,019
EDS3_9	5	139-1	1,76	-0,067
EDS5_5	0,1	141-1	1,74	-0,247
EDS4_8	0,1	140-1	1,72	-0,233
EDS2_9	0,1	119-1	1,71	-0,173
EDS4_6	0,1	144-475	1,70	-0,035

Ensayo	Carga (MPa)	Trayectoria (MPa)	ρ_d inicial (g/cm ³)	$\Delta e / \Delta \log s$
EDS3_9	0,1	138-506	1,72	-0,034
EDS5_5	0,1	138-520	1,72	-0,034
EDS4_8	0,1	118-523	1,71	-0,046

Los valores obtenidos están en el orden de los recogidos por Fredlund & Rahardjo (1993) para diferentes tipos de suelos arcillosos, comprendidos entre -0,07 y -0,29.

Se observa que los valores de la pendiente para las trayectorias de secado son muy inferiores a los de las trayectorias de humectación bajo la misma carga, lo que indica la escasa deformabilidad del suelo al sobrepasar cierto valor de succión, como ya se constató al analizar las trayectorias de secado por encima de 120 MPa en la sección anterior.

Los valores correspondientes a las trayectorias de humectación se representan en la Figura 164, en la que se observa una relación logarítmica entre la magnitud de la deformación (e) asociada a determinado cambio de succión (s) y la carga aplicada durante el proceso (σ), siendo mayor la deformación cuanto menor es la carga, lo que puede expresarse mediante la siguiente relación:

$$\Delta e / \Delta \log s = 0,044 \ln \sigma - 0,113 \quad (r^2 = 0,93)$$

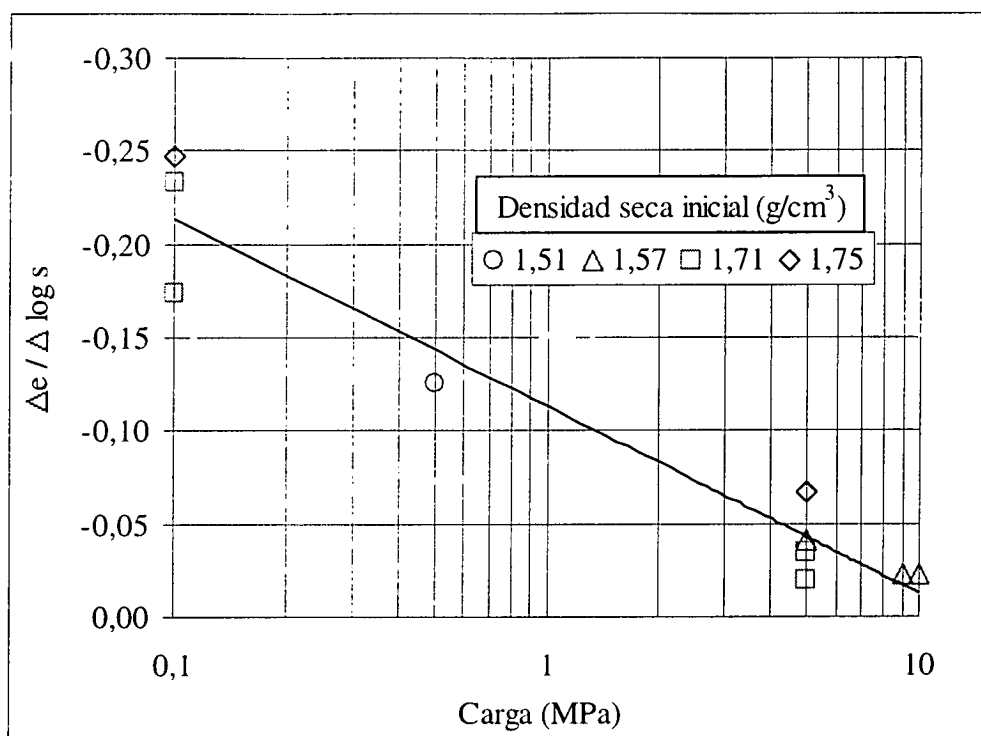


Figura 164: Pendiente de la relación “índice de poros / logaritmo de la succión” para las trayectorias de hidratación bajo diferentes cargas indicadas en la Tabla XLVII

El comportamiento observado concuerda con los modelos que proponen que la expansión microestructural debida a la disminución de la succión es mayor cuanto menor es la carga aplicada, lo que da lugar a una reorganización de la macroestructura por la que su índice de poros aumenta más cuanto menor es la carga aplicada. De esta manera se produce un aumento de volumen plástico y un reblandecimiento del material que modifican el efecto posterior de la carga sobre él (Gens & Alonso 1992), como se observó en los ensayos descritos más arriba.

Presión de preconsolidación

Como se indicó al inicio de este capítulo, las muestras ensayadas en los edómetros con control de succión se compactaron uniaxialmente bajo una carga de 20 MPa para obtener una densidad seca nominal de 1,70 g/cm³. Esto supone que, dado el máximo nivel de carga alcanzable en los equipos edométricos, que está en torno a los 10 MPa, las muestras están sobreconsolidadas al inicio de los ensayos y si no se reduce la succión inicial (130 MPa). Sin embargo, la modificación de la estructura de la muestra, por ejemplo, por hidratación

bajo una carga pequeña, con lo que se obtienen estructuras más abiertas de mayor porosidad, puede dar lugar a una disminución del valor de la preconsolidación.

Este aspecto se ha analizado mediante la determinación de la presión de preconsolidación (σ'_p) en los gráficos de evolución del índice de poros por aumento de carga bajo succión constante. Los valores obtenidos se recogen en la Tabla XLVIII. En todos los ensayos (excepto el EDS1_10) la carga ha sido precedida de hidratación bajo una sobrecarga que se indica también en la tabla. Esto da lugar a una disminución notable de la densidad seca. En el ensayo EDS1_10 la carga tuvo lugar en las condiciones de humedad higroscópica (succión aproximada 130 MPa), sin hidratación previa, por lo que se considera que la presión de preconsolidación es la de compactación.

Tabla XLVIII: Presión de preconsolidación para diferentes ensayos

Ensayo	Succión (MPa)	Sobrecarga ¹ (MPa)	ρ_d ¹ (MPa)	σ'_p (MPa)
EDN1_5	14	0,1	1,50	1,5
EDN3_10	14	0,1	1,55	3,0
EDN4_7	0,1	0,5	1,40	1,3
EDS5_5	1,3	0,1	1,31	1,0
EDS1_10	127		1,68	20
EDS2_9	3,9	0,1	1,47	1,5

¹Sobrecarga durante la hidratación previa

²Densidad seca al final del primer escalón de carga

Estos valores se representan en la Figura 165. Se observa cómo, a medida que disminuye la succión y la densidad seca es más baja, es decir, la estructura más abierta, la presión de preconsolidación disminuye desde los 20 MPa iniciales hasta valores de entre 1 y 3 MPa, siendo menores cuanto menor es la densidad seca al comienzo de la carga. Así mismo, cuando la hidratación previa se produce bajo una sobrecarga más elevada, la presión de preconsolidación tiende a ser mayor, porque la estructura resultante no es tan abierta (ensayo EDN4_7). Gens & Alonso (1992) atribuyen este tipo de comportamiento a las deformaciones microestructurales que se producen durante el hinchamiento, que como ya se señaló, son mayores cuanto menor es la sobrecarga bajo la que se produce la hidratación. El hinchamiento de la microestructura afecta al esqueleto del suelo,

produciendo un reblandecimiento y una reducción de la zona con comportamiento elástico (desplazamiento de la superficie LC – loading/collapse– hacia valores menores de carga), con lo que se reduciría la presión de preconsolidación. Esta reducción será más importante cuanto menor sea la carga bajo la que se realizó la hidratación previa.

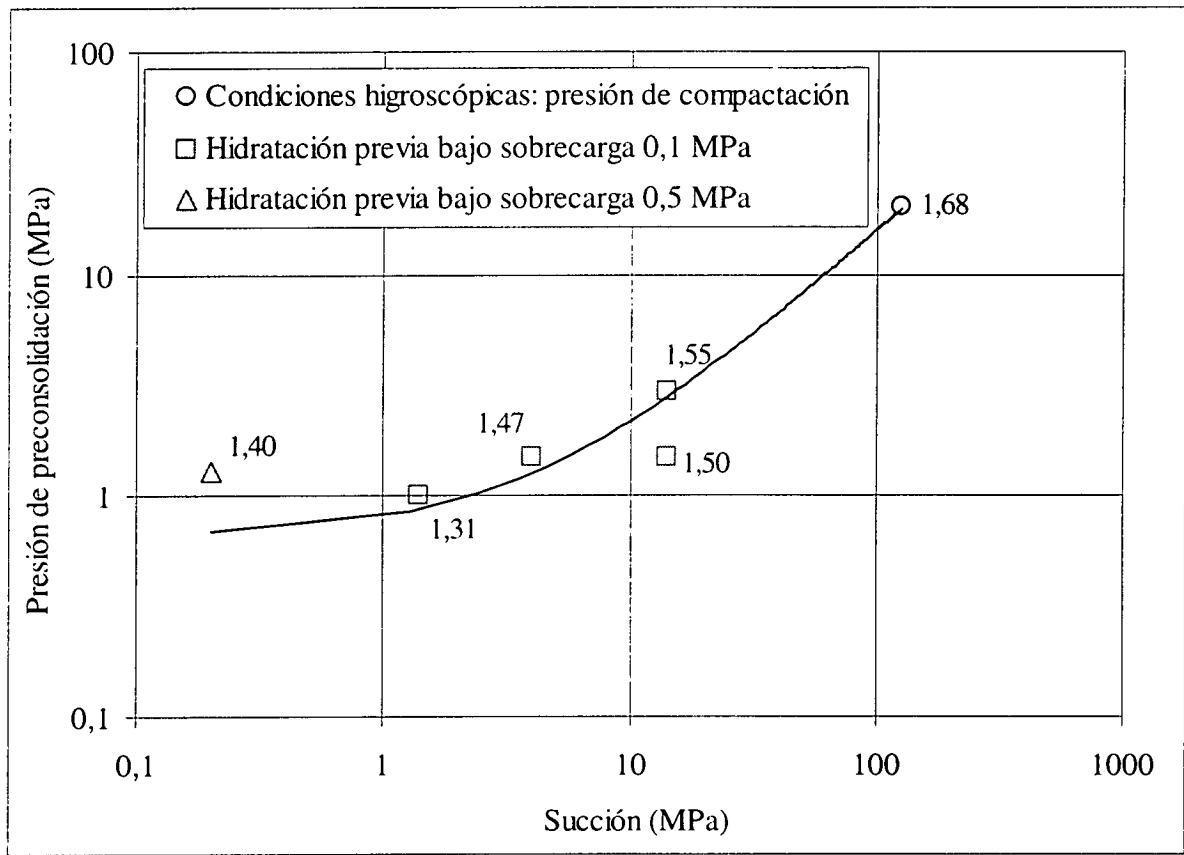


Figura 165: Presión de preconsolidación para diferentes ensayos de carga bajo succión constante, con indicación de la densidad seca al final del primer escalón de carga en g/cm³

Se han determinado también los valores de las pendientes de las rectas que –en escala semilogarítmica– relacionan el índice de poros con la carga (en MPa) en las trayectorias de carga bajo succión constante (índice C_1 de Fredlung & Rahardjo (1993), equivalente al índice de compresión (C_c) en suelos saturados) y los valores de esta pendiente en las trayectorias de descarga bajo succión constante (equivalente al índice de hinchamiento (C_s) en suelos saturados). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla XLIX, junto a la trayectoria concreta a que corresponden. Los valores del índice de compresión pueden clasificarse en dos grupos, según que correspondan a trayectorias en las que el valor de la carga permanece por debajo de la presión de preconsolidación o por encima, es decir,

trayectorias en las que la muestra permanece sobreconsolidada o no, según se muestra en la Figura 166.

Tabla XLIX: Índices de compresión e hinchamiento obtenidos en los ensayos edométricos con succión controlada

Ensayo	Succión (MPa)	Trayectoria (MPa)	C_c / C_s	Sobreconsolidación S/N
EDN4_7	0,1	3,0 - 5,0	-0,214	N
EDS5_5	1,3	1,5 - 5,0	-0,302	N
EDS2_9	3,9	3,0 - 8,4	-0,180	N
EDN1_5	14	1,5 - 5,0	-0,149	N
EDN3_10	14	3,0 - 9,0	-0,129	N
EDS1_10	127	0,5 - 9,1	-0,023	S
EDS3_9	505	3,0 - 5,1	-0,012	S
EDN1_5	0	5,0 - 0,1	-0,112	N
EDN5_6	0	9,9 - 0,1	-0,125	
EDN3_10	0	9,0 - 0,1	-0,083	N
EDN4_7	0	5,0 - 0,1	-0,076	N
EDN3_9	0	9,5 - 0,2	-0,156	
EDS4_6	1,3	5,7 - 0,1	-0,080	
EDS3_10	1,3	9,0 - 0,1	-0,030	
EDS3_9	1,3	5,1 - 0,1	-0,114	S
EDS5_5	1,3	5,0 - 0,01	-0,151	
EDS1_10	1,3	9,1 - 0,1	-0,111	S
EDS2_9	1,3	8,4 - 0,1	-0,038	N

Se observa que el índice de compresión tiende a disminuir a medida que aumenta la succión, siendo notablemente más bajo para las muestras que están sobreconsolidadas. A pesar de ello, estos índices de deformación por carga son mayores que los índices de deformación por efecto del cambio de succión (C_m) recogidos en la Tabla XLVII.

Aunque habitualmente los índices de hinchamiento son un 10-20 % de los índices de compresión (algo más altos en arcillas expansivas), en estos ensayos, para las succiones

bajas, los índices de hinchamiento son en promedio el 50 % de los índices de compresión, es decir, los valores encontrados son altos en relación con los del índice de compresión.

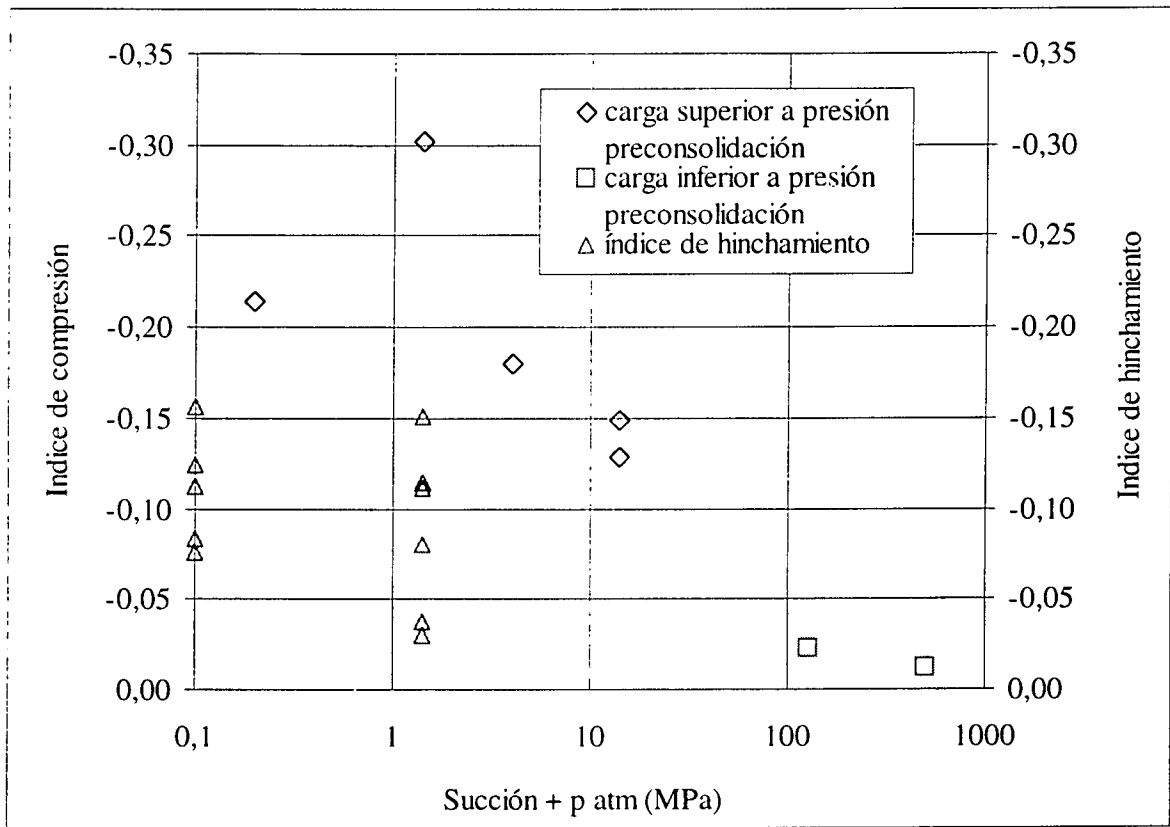


Figura 166: Índices de compresión e hinchamiento obtenidos en las trayectorias de carga y descarga bajo succión constante

Descarga

La mayor parte de los ensayos edométricos realizados han finalizado con una descarga rápida y escalonada de la muestra una vez alcanzado el mínimo valor de succión. Este valor de succión ha sido de 0 MPa para los edómetros realizados con control de succión mediante presión de nitrógeno y de 1,3 MPa para los edómetros realizados con control de succión mediante disoluciones. La descarga se ha realizado en 3 ó 4 escalones, cuya duración ha sido de un día cada uno, o como máximo, de tres días. Cuando la descarga se ha realizado siguiendo estas pautas, el aumento del índice de poros (e) al disminuir la carga (σ, MPa) es logarítmico, como se ha podido comprobar en las secciones anteriores:

$$e = a \ln \sigma + b$$

Los parámetros a y b de esta ecuación, ajustados para cada ensayo, se recogen en la Tabla L, donde también se indica la densidad seca de la muestra al comienzo de la descarga, la succión bajo la que ésta se realiza y el índice de hinchamiento (C_s).

En los casos en que alguno de los escalones de descarga se ha prolongado por más tiempo del previsto, la evolución del índice de poros ya no sigue esta tendencia (ensayos EDN1_5, EDN3_9, EDN3_10 y EDS3_10), lo que indica que no se ha alcanzado el equilibrio tras 24 horas.

Tabla L: Parámetros de ajuste de la ecuación logarítmica que relaciona índice de poros con carga durante la descarga final de los ensayos

Ensayo	Temperatura (°C)	ρ_d^1 (g/cm ³)	Succión (MPa)	a	b	C_s
EDN4_7	20	1,48	0	-0,033	0,871	-0,08
EDN5_6	20	1,61	0	-0,055	0,773	-0,12
EDS1_10	20	1,70	1	-0,048	0,713	-0,11
EDS3_9*	20	1,61	1	-0,050	0,753	-0,11
EDS4_6*	20	1,63	1	-0,035	0,721	-0,08
EDS5_5*	20	1,54	1	-0,066	0,843	-0,15
EDNC_10	40	1,60	0	-0,063	0,791	-0,15
EDNC_11	60	1,61	0	-0,068	0,793	-0,16

¹ Densidad seca al inicio de la descarga
 * Ensayos que incluyen secado intenso

La descarga de los ensayos que han seguido una trayectoria en la que se incluía el secado intenso de la muestra por disminución de la succión (EDS3_9, EDS4_6 y EDS5_5), puede ajustarse a una ecuación que incluye el valor de la densidad seca al comienzo de la descarga (ρ_d^1 , g/cm³):

$$e = (0,31\rho_d^1 - 0,55) \times \ln \sigma + (-1,34\rho_d^1 + 2,92)$$

La Figura 167 muestra los resultados de la descarga de varios ensayos, y los ajustes obtenidos con la ecuación anterior para ensayos que han sufrido secado previo en función de su densidad seca al comienzo de la descarga. La figura incluye también un ajuste

obtenido para ensayos realizados a temperatura superior a 20 °C (40 y 60 °C) con una densidad seca al inicio de la descarga de 1,60 g/cm³:

$$e = -0,065 \ln \sigma + 0,792$$

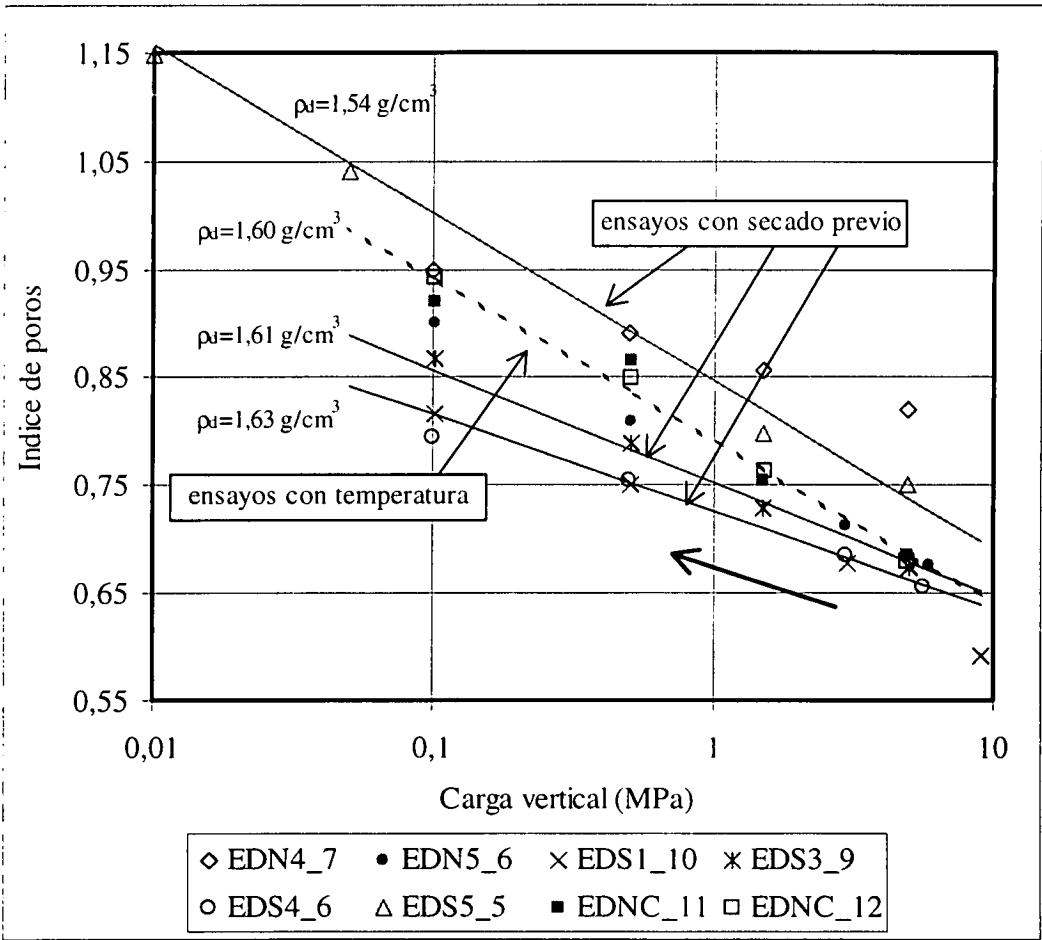


Figura 167: Evolución del índice de poros durante la descarga en saturación de diferentes ensayos, y ajustes logarítmicos (junto a éstos se muestra el valor de la densidad seca al comenzar la descarga)

Presión de hinchamiento

Se han realizado varios ensayos de medida de la presión de hinchamiento para succiones decrecientes. Como ya se indicó, se ha considerado que la presión de hinchamiento de un suelo no saturado es la carga externa bajo la que la muestra no sufre cambio de volumen al hidratarse. Aunque la densidad seca nominal al comienzo de los ensayos es de 1,70 g/cm³, la capacidad de carga de los equipos –máximo 10 MPa– no ha permitido mantenerla

constante hasta el final de la determinación, ya que, la presión de hinchamiento teórica para una muestra saturada de esta densidad es de 11,5 MPa (cf. sección “Presión de hinchamiento”). Por este motivo, en la mayoría de los casos, los valores de presión de hinchamiento obtenidos corresponden a muestras cuya densidad seca sufre cierta disminución durante la hidratación.

Las trayectorias concretas seguidas y los resultados de cada ensayo se representan en la Figura 168, en la que se incluyen los valores teóricos de presión de hinchamiento para muestras saturadas de la misma densidad seca. Estos valores se han calculado mediante el ajuste que se obtuvo a partir de los resultados de ensayos de presión de hinchamiento sobre muestras fabricadas por compactación de la arcilla con su humedad higroscópica a diferentes densidades secas saturadas con agua destilada (sección “Presión de hinchamiento: Variación en función del índice de poros”):

$$\ln P_s = 6,77 \rho_d - 9,07 \quad (r^2 = 0,88)$$

A la hora de comparar los valores de presión de hinchamiento para muestra saturada obtenidos en los edómetros con succión controlada y los valores teóricos calculados con este ajuste, es necesario recordar que la diferencia observada entre los valores experimentales y el ajuste fue en promedio del 25 %.

En la figura se observa que la presión de hinchamiento de la muestra no saturada aumenta de forma logarítmica entre los 130 MPa (la succión correspondiente a la humedad higroscópica) y los 10 MPa, pero por debajo de este valor el aumento se atenúa. Los datos obtenidos apuntan a que la muestra está ya completamente saturada para succiones de 4 MPa o bien el aumento de grado de saturación correspondiente a la disminución de la succión desde 4 hasta 0 MPa debe de ser pequeño –según se desprende de las curvas de retención–, por lo que la muestra alcanza su porosidad de equilibrio bajo la carga aplicada y ya no se producen incrementos de la presión de hinchamiento. Aunque la microestructura experimentase cierto hinchamiento, el desarrollo de colapsos en la macroestructura para estas cargas elevadas y bajas succiones contribuiría a que el volumen de la muestra no variase.

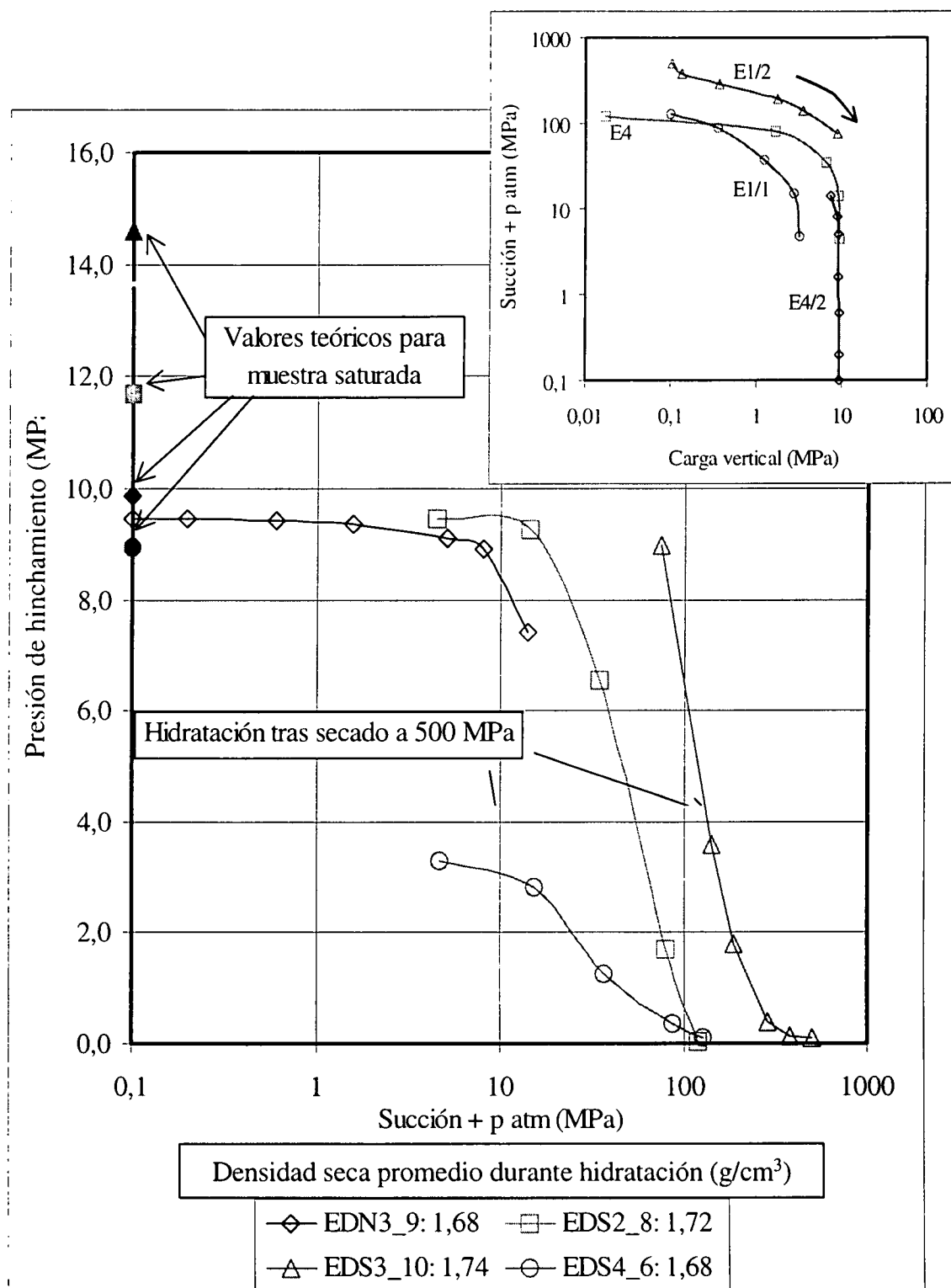


Figura 168: Presión de hinchamiento obtenida para succiones decrecientes siguiendo las trayectorias E4/2 (ensayo EDN3_9), E4 (ensayo EDS2_8), E1/2 (ensayo EDS3_10) y E1/1 (ensayo EDS4_6)

En todo el intervalo de succión ensayado la presión de hinchamiento es función de la densidad seca, siendo mayor cuanto mayor es ésta. Por otra parte, para succiones superiores a los 200 MPa apenas se desarrolla presión de hinchamiento.

En el ensayo EDN3_9 (trayectoria E4/2 en edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno), se llega al límite de carga del equipo para succiones inferiores a 1,5 MPa, sin que esto suponga una disminución significativa de la densidad seca de la muestra. Al llegar a succión nula, la muestra saturada tiene una densidad seca de 1,68 g/cm³ bajo la máxima carga permitida por el equipo, que es de 9,5 MPa. Este valor de presión de hinchamiento está en el orden de los valores obtenidos para arcilla saturada de la misma densidad según el ajuste mostrado previamente.

En el ensayo EDS2_8 (trayectoria E4 en edómetros con control de succión mediante disoluciones), que se inicia con una densidad seca de 1,73 g/cm³, para succiones inferiores a 14 MPa no ha sido posible contrarrestar el hinchamiento. En el último escalón se alcanza el equilibrio bajo una succión de 4,4 MPa con una carga de 9,5 MPa, quedando la muestra con una densidad seca de 1,70 g/cm³. La presión de hinchamiento teórica de la muestra saturada a esta densidad debería ser de 11,5 MPa. A la vista de la pequeña variación de la presión de hinchamiento para succiones bajas que se ha medido en otros ensayos, en este ensayo se habría obtenido un valor de presión de hinchamiento algo inferior al teórico, pero dentro de la desviación esperable.

Se han realizado también dos ensayos de presión de hinchamiento tras someter la muestra a un secado intenso por aumento de la succión hasta valores superiores a 500 MPa en los edómetros con control de succión mediante disoluciones. Estos ensayos han sido el EDS3_10 (trayectoria E1/2) y el EDS4_6 (trayectoria E1/1). En el primero de ellos, se determina la presión de hinchamiento de la muestra con la densidad seca al final del secado, 1,74 g/cm³, por lo tanto mayor que en el resto de los ensayos. En el ensayo EDS4_6, tras el secado se vuelve a disminuir la succión, y cuando se alcanza el valor inicial, 130 MPa, se comienzan a aplicar las cargas necesarias para determinar la presión de hinchamiento.

El valor de presión de hinchamiento para una succión de 4,7 MPa obtenido en el ensayo EDS4_6 es de 3,3 MPa, muy inferior al que correspondería a una muestra saturada de la

misma densidad seca, $1,66 \text{ g/cm}^3$ (8,7 MPa). Por debajo de esta succión la densidad seca de la muestra disminuye, debido a las limitaciones de carga del equipo, alcanzando un valor de $1,63 \text{ g/cm}^3$ para succión de 1,3 MPa, bajo una carga de 5,7 MPa, que es también inferior al valor teórico de la presión de hinchamiento para la muestra saturada, que sería de 7,2 MPa (no representado en la figura). En cualquier caso, el valor final de presión de hinchamiento obtenido permanece dentro de los márgenes de desviación verificados experimentalmente.

Sin embargo, en el ensayo EDS3_10 se observa cómo, para succiones por debajo de 80 MPa, la presión de hinchamiento de la muestra supera el límite de carga del equipo (9 MPa), por lo que su densidad seca empieza a disminuir, llegándose para succión 4 MPa a un valor de $1,63 \text{ g/cm}^3$, que se mantiene hasta el valor mínimo de succión. Esta presión de hinchamiento de 9 MPa es superior a la teórica para una muestra saturada de densidad seca $1,63 \text{ g/cm}^3$, que sería de 7,2 MPa, pero también dentro del rango de dispersión observado en la bentonita FEBEX.

Por tanto, los resultados de los dos ensayos de presión de hinchamiento realizados sobre muestra previamente desecada han sido dispares, pero en ambos casos los valores obtenidos están en el rango teórico de variación de este parámetro para la bentonita FEBEX. Esto sugiere que el secado por aumento de la succión hasta 500 MPa no provoca una modificación de la presión de hinchamiento que sea apreciable con las técnicas experimentales disponibles. El ensayo EDS3_10, apunta a que la presión de hinchamiento desarrollada tras el secado es incluso mayor que la de la muestra no tratada, lo que concuerda con la elevada capacidad de hinchamiento que se ha registrado en muestras sometidas previamente a succiones elevadas (*cf.* sección “Trayectorias de secado”).

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA

Conductividad térmica

La conductividad térmica se ha medido con un equipo Kemtherm QTM-D3 que funciona según el método transitorio del hilo caliente. La medida se realiza a temperatura ambiente,

por triplicado sobre cada muestra. Se han utilizado pequeños bloques de arcilla (10x4x3 cm) obtenidos por compactación uniaxial a densidades secas nominales de 1,60, 1,65, 1,70 y 1,75 g/cm³. Para la compactación se ha utilizado la arcilla granulada, bien con su humedad higroscópica, o bien con una humedad añadida. En este último caso, tras realizar la mezcla de arcilla y agua, las muestras han permanecido varios días en bolsas de plástico cerradas para garantizar el reparto homogéneo de humedad. Las presiones de compactación han sido de entre 12 y 35 MPa, dependiendo de la densidad seca, para los bloques fabricados a partir de la arcilla con su humedad higroscópica. Para los bloques fabricados con la arcilla con humedad del 20 %, las presiones de compactación han estado entre 23 MPa, para las densidades secas más bajas, y 65 MPa, para las densidades más altas. Tras realizar la medida de conductividad térmica, algunos de estos bloques se han secado en estufa a 100 °C durante 24 horas, y, una vez enfriados, se ha vuelto a determinar su conductividad térmica. Al finalizar la medida, todos los bloques sobre los que se ha realizado la determinación, tanto los que se secaron como los que no, se vuelven a pesar y medir y se determina su humedad por secado en estufa, para comprobar la humedad real y el cambio de densidad.

En la mayor parte de los ensayos la medida se ha efectuado aplicando la sonda en la superficie de compactación de la probeta, por lo que el valor obtenido es el de la conductividad en la dirección paralela al esfuerzo de compactación. Sin embargo, para conocer la influencia de la dirección de medida en el valor de la conductividad térmica, y por tanto la anisotropía de esta propiedad, algunas muestras se han medido por dos caras contiguas de la probeta, es decir, en dirección paralela y perpendicular al esfuerzo de compactación.

Los valores medios de la conductividad térmica, medida en dos direcciones respecto a la de compactación (λ paralela, λ perpend.), de la densidad seca (ρ_d), de la humedad (w), del grado de saturación (S_r) y del contenido volumétrico en agua (θ) de cada probeta se muestran en las siguientes tablas. Los datos se han agrupado en función de la densidad seca de la probeta, lo que ha permitido distinguir cuatro intervalos de densidad:

- Probetas de densidad seca entre 1,49 y 1,55 g/cm³, con un valor medio de 1,53 g/cm³.

Los resultados de los ensayos realizados en estas probetas se muestran en la Tabla LI.

- Probetas de densidad seca entre 1,58 y 1,65 g/cm³, con un valor medio de 1,61 g/cm³. Los resultados de los ensayos realizados en estas probetas se muestran en la Tabla LII.
- Probetas de densidad seca entre 1,66 y 1,74 g/cm³, con un valor medio de 1,70 g/cm³. Los resultados de los ensayos realizados en estas probetas se muestran en la Tabla LIII.
- Probetas de densidad seca 1,75 g/cm³. Los resultados de los ensayos realizados en estas probetas se muestran en la Tabla LIV.

Los bloques con humedad próxima a 0 % son aquéllos que se secaron en estufa tras su compactación con una humedad diferente. Este proceso de secado conlleva un aumento de la densidad seca por retracción. La densidad al final de la determinación es la que está indicada en las tablas. La pequeña toma de humedad observada (valores algo mayores que 0 %), se produce durante el proceso de medida, que tiene lugar en las condiciones de temperatura y humedad relativa del laboratorio.

Tabla LI: Conductividad térmica (λ) de probetas de densidades secas entre 1,49 y 1,55 g/cm³ (densidad seca media 1,53 g/cm³)

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S _r [*] (%)	λ paralela (W/m·K)	λ perpend. (W/m·K)	θ
1,53	0,1	0,00	0,48		0,00
1,55	0,9	0,03	0,48		0,01
1,55	0,9	0,03	0,50		0,01
1,53	1,7	0,06	0,50		0,03
1,49	14,2	0,48	0,75		0,24
1,51	15,0	0,51	0,76	0,71	0,26
1,54	18,1	0,64	0,92		0,33
1,52	20,0	0,70	0,91	0,90	0,36
1,52	25,0	0,87	1,09	1,15	0,48

^{*}Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla LII: Conductividad térmica (λ) de probetas de densidades secas entre 1,58 y 1,65 g/cm³
(densidad seca media 1,61 g/cm³)

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r^* (%)	λ paralela (W/m·K)	λ perpend. (W/m·K)	θ
1,58	0,1	0,00	0,48		0,00
1,60	1,0	0,04	0,55		0,02
1,59	1,1	0,04	0,58		0,02
1,60	2,0	0,08	0,57		0,03
1,63	12,6	0,52	0,73		0,23
1,60	13,1	0,51	0,68		0,24
1,60	13,3	0,52	0,61		0,24
1,64	13,8	0,57	0,91		0,26
1,58	15,0	0,57	0,81	0,73	0,27
1,63	15,0	0,62	0,95	0,89	0,28
1,65	15,0	0,64	1,00	0,89	0,28
1,59	15,4	0,60	0,70		0,28
1,59	15,5	0,60	0,70		0,28
1,60	15,5	0,61	0,78		0,29
1,61	18,6	0,74	1,12		0,36
1,59	20,0	0,77	1,12	0,99	0,38
1,65	20,0	0,85	1,18	1,16	0,40
1,60	20,4	0,80	1,22		0,39
1,63	25,3	1,04	1,27		0,52
1,64	25,4	1,06	1,31		0,52
1,62	26,0	1,05	1,27		0,53
1,62	26,2	1,06	1,30		0,54
1,60	26,6	1,04	1,25		0,54
1,61	27,1	1,08	1,28		0,55
1,59	27,4	1,06	1,26		0,56

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla LIII: Conductividad térmica (λ) de probetas de densidades secas entre 1,66 y 1,74 g/cm³
(densidad seca media 1,70 g/cm³)

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r^* (%)	λ paralela (W/m·K)	λ perpend. (W/m·K)	θ
1,67	0,1	0,00	0,64		0,00
1,72	0,5	0,02	0,63		0,01
1,70	1,2	0,06	0,68		0,02
1,74	1,4	0,07	0,72		0,02
1,66	1,9	0,08	0,62		0,03
1,73	11,9	0,57	0,83		0,23
1,72	12,9	0,61	0,81		0,25
1,70	13,1	0,60	0,79		0,25
1,67	13,4	0,58	1,05		0,25
1,74	13,7	0,67	0,90		0,27
1,70	14,4	0,66	1,03		0,28
1,69	15,0	0,68	0,95	0,95	0,29
1,71	15,0	0,70	0,94		0,29
1,70	16,8	0,77	1,19		0,33
1,71	17,0	0,80	1,23		0,34
1,67	20,0	0,88	1,14	1,17	0,40
1,72	20,0	0,95	1,43	1,39	0,41
1,73	21,6	1,04	1,22		0,45
1,70	21,8	1,00	1,27		0,45
1,69	22,3	1,01	1,25		0,46
1,71	22,6	1,05	1,25		0,47
1,69	22,7	1,03	1,27		0,47

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

Tabla LIV: Conductividad térmica (λ) de probetas de densidad seca 1,75 g/cm³

ρ_d (g/cm ³)	w (%)	S_r^* (%)	λ paralela (W/m·K)	θ
1,76	16,2	0,82	1,27	0,33
1,75	20,4	1,01	1,24	0,43
1,76	20,5	1,04	1,23	0,43

*Grado de saturación calculado considerando la densidad del agua libre

En la Figura 169 se muestran gráficamente los valores de la conductividad térmica en la dirección paralela al esfuerzo de compactación en función de la humedad para los diferentes intervalos de densidad. La conductividad térmica (λ , W/m·K) puede relacionarse con la humedad (w , %), en el intervalo estudiado, mediante una relación exponencial. Esta relación, en la que también se ha incluido la contribución de la densidad seca (ρ_d , g/cm³), tiene la siguiente expresión:

$$\lambda = (0,8826 \rho_d - 0,8909) e^{(0,03 w)}$$

Los ajustes mostrados en la Figura 169 están obtenidos con esta ecuación.

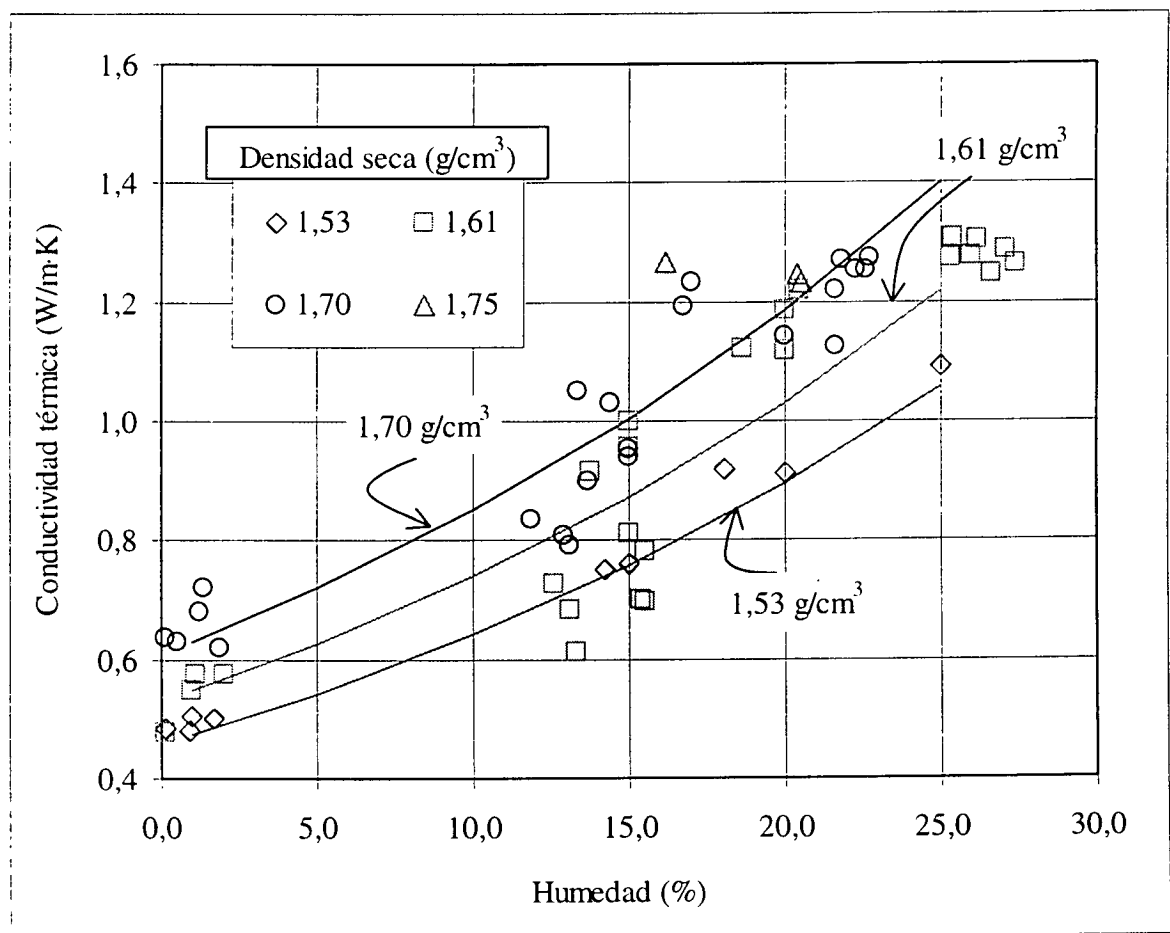


Figura 169: Conductividad térmica en función de la humedad para diferentes densidades secas

Los valores de conductividad térmica obtenidos están en el orden de los encontrados por otros autores para materiales similares. Beziat et al. (1988) presentan unos valores de

conductividad térmica para una esmectita cálcica, compactada en un intervalo de densidad y con una humedad similares a los de este estudio, de entre 0,57 y 1,32 W/m·K. Pusch (1994) da un valor para la bentonita compactada con su humedad higroscópica de 0,7 W/m·K, y para la bentonita compactada a la misma densidad pero completamente saturada de 1,5 W/m·K. En ambos trabajos se constata el importante aumento de la conductividad térmica con la humedad y con la densidad.

El aumento de la conductividad térmica con la humedad para una misma densidad (y por tanto porosidad) se debe a que la conductividad térmica del agua (0,58 W/m·K) es más alta que la del aire (0,025 W/m·K), 23 veces mayor, por lo que el aumento del contenido en agua en los poros se traduce en un aumento de la conductividad térmica global. Por otra parte, se observa que este aumento no es lineal. Esto es debido a que, por debajo de determinado valor de humedad el agua está adsorbida o formando una película sobre las partículas minerales. Para humedades mayores se comienza a producir el llenado de los poros, con lo que se forman “puentes” de agua entre los huecos rellenos de aire, aumentando la conductividad térmica de forma importante. Por encima de determinada humedad los incrementos en contenido de agua tienen un efecto pequeño sobre el valor de la conductividad (Tindall & Kunkel 1999).

El aumento de densidad contribuye también al aumento de la conductividad térmica, debido a que la disminución de la porosidad supone una reducción del espacio ocupado por agua o aire, componentes ambos con una conductividad mucho menor que la de las partículas minerales.

La Figura 170 muestra los valores de conductividad térmica para las probetas en que ésta se ha medido en dirección paralela y perpendicular a la compactación. No hay variación importante de la conductividad térmica en una dirección respecto a la otra, aunque suele ser ligeramente más alta cuando se mide paralelamente a la dirección del esfuerzo de compactación, disminuyendo la diferencia al aumentar la humedad, llegando incluso a invertirse la relación para humedad del 25 %. Esta falta de anisotropía, que ya se ha observado en otras propiedades (permeabilidad, curva de retención), confirma que no se produce reorganización de los agregados durante la compactación. La disipación de calor a

través de la barrera del almacenamiento tendrá lugar principalmente, en sentido radial, es decir, perpendicular al esfuerzo de compactación de los bloques.

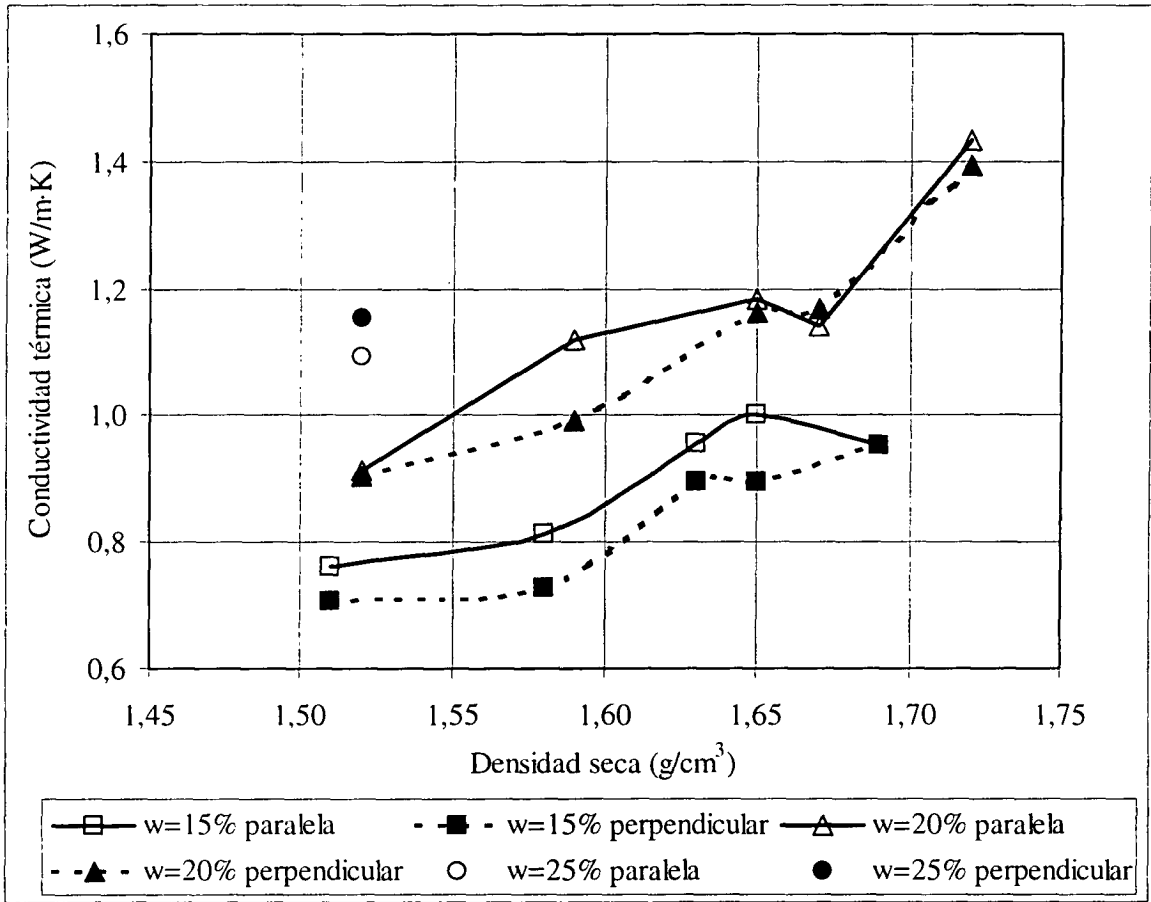


Figura 170: Conductividad térmica, medida en dirección paralela y perpendicular a la superficie de compactación, en función de la densidad seca y la humedad de los bloques

En la Figura 171 se representan todos los valores de conductividad térmica (λ , W/mK), agrupados por intervalos de densidades, en función del grado de saturación (S_r). Se ha determinado una correlación entre el grado de saturación (S_r) y el coeficiente de conductividad térmica. Para ello se ha utilizado una ecuación de tipo sigmoideal (Boltzmann):

$$\lambda = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{(S_r - x_0)}{dx}}} + A_2$$

donde A_1 representa el valor de λ para $S_r=0$, A_2 el valor de λ para $S_r=1$, x_0 el grado de saturación para el cual la conductividad térmica es el promedio entre los dos valores

extremos, y dx es un parámetro. Esta ecuación se ha elegido porque representa bien el comportamiento de la conductividad en función de la humedad (grado de saturación), que como vimos más arriba están directamente relacionadas pero no de forma lineal.

El ajuste obtenido, con un r^2 de 0,923, da los siguientes valores para cada parámetro:

$$A_1 = 0,57 \pm 0,02$$

$$A_2 = 1,28 \pm 0,03$$

$$x_0 = 0,65 \pm 0,01$$

$$dx = 0,100 \pm 0,016$$

En la figura se incluyen también los ajustes obtenidos con los valores correspondientes a dos intervalos de densidad.

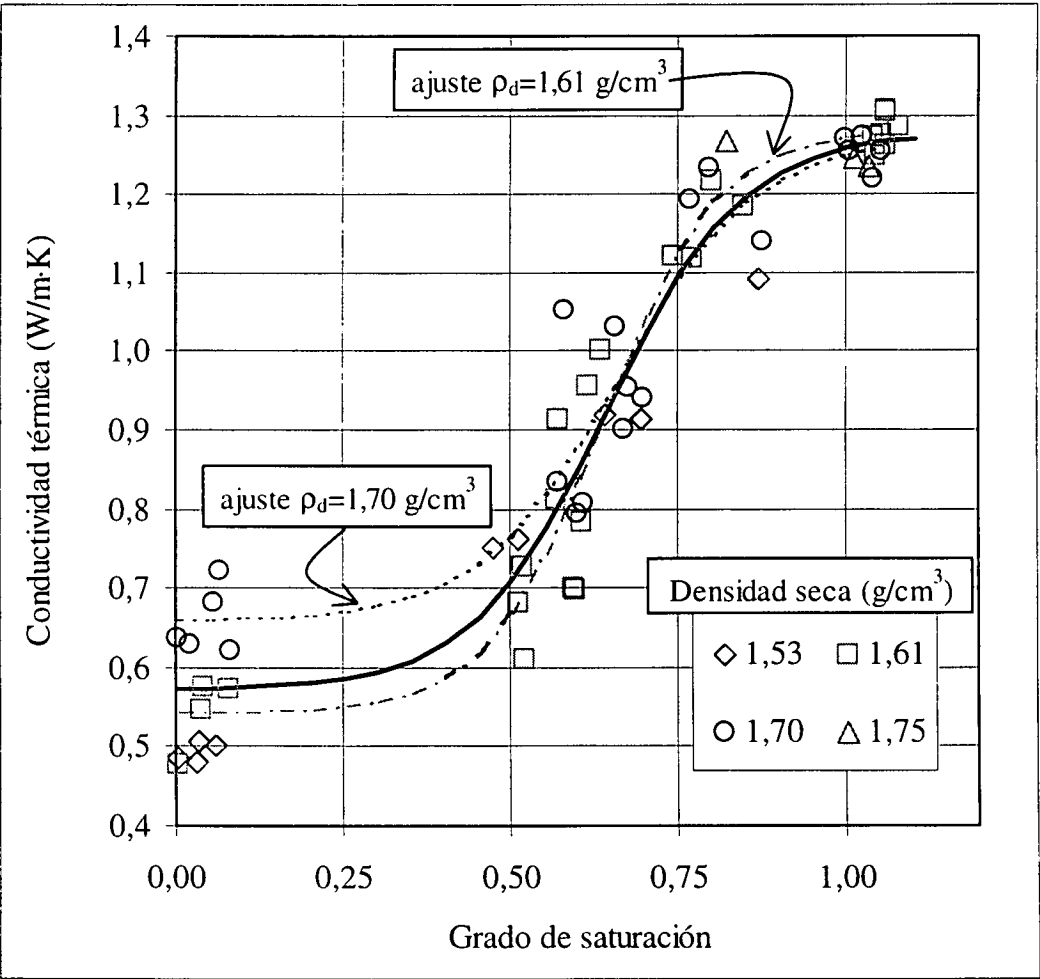


Figura 171: Conductividad térmica en función del grado de saturación y ajuste para todos los puntos (línea continua) y para dos intervalos de densidad

Puede observarse una distinción clara en función de la densidad seca para los grados de saturación bajos, siendo mayor la conductividad térmica de las muestras con mayor densidad seca para un mismo grado de saturación. Sin embargo, esta diferencia se atenúa al aumentar el grado de saturación. Los parámetros de las líneas de regresión para densidades secas de 1,61 y 1,70 g/cm³ de la Figura 171 se muestran en la Tabla LV. El parámetro A₁ (conductividad térmica de la muestra seca) es mayor para las muestras de mayor densidad seca, mientras que el parámetro A₂ (conductividad térmica de la muestra saturada) es algo menor. Esto último es debido a que la conductividad térmica de una muestra de densidad baja sufre mayor aumento según se va saturando que la de una muestra de mayor densidad seca, ya que su porosidad es mayor y puede tomar más agua; de hecho, las muestras de menor densidad seca necesitan más agua para saturarse. La repercusión de la humedad sobre el valor de la conductividad térmica es muy importante, siendo el coeficiente de correlación entre humedad y conductividad térmica de 0,89, mientras que el coeficiente de correlación entre densidad seca y conductividad térmica es sólo de 0,39.

Tabla LV: Coeficientes de los ajustes de tipo Boltzman entre conductividad térmica y grado de saturación

Coeficientes del ajuste	Intervalo de densidad seca 1,58-1,65 g/cm ³	Intervalo de densidad seca 1,66-1,74 g/cm
r ²	0,953	0,901
A ₁	0,54±0,03	0,66±0,03
A ₂	1,28±0,03	1,27±0,04
x ₀	0,64±0,02	0,66±0,03
dx	0,085±0,016	0,103±0,036

Hay que tener en cuenta que los bloques para la determinación de la conductividad térmica han sido compactados a partir de la arcilla con determinada humedad, sometiéndola a elevadas presiones. Es decir, no se han saturado a volumen libre. Este hecho puede condicionar la estructura del agua en la arcilla y sus propiedades.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Se han estudiado diversos aspectos del comportamiento termo-hidro-mecánico de una bentonita procedente del yacimiento Cortijo de Archidona (Almería), elegida como material español de referencia para el sellado de almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad. Las principales conclusiones obtenidas durante el estudio se resumen a continuación, clasificadas según su ámbito de aplicación.

PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

La determinación de parámetros físicos básicos en materiales muy expansivos exige una modificación de las técnicas convencionales que se establecen en las Normas UNE y en otros procedimientos habituales de laboratorio. Se han realizado las siguientes observaciones referidas a la adecuación de los métodos y a la interpretación de los resultados obtenidos:

- La gran capacidad de absorber agua de la bentonita hace necesario que, para la determinación del límite líquido, se aumente el tiempo de humectación de la pasta hasta 48 horas, con el fin de asegurar su humectación completa. Por el mismo motivo, para la obtención de la distribución granulométrica, se ha aumentado el tiempo de suspensión hasta 48 horas, en lugar de las 18 que establece la Norma. Por las particularidades de agregación de esta bentonita (*cf.* sección “Límites de Atterberg, superficie específica y granulometría”) se ha intensificado el tratamiento para la dispersión previa al análisis granulométrico, incluyendo en él ciclos de agitación mecánica y ultrasonido.
- Los datos porosimétricos obtenidos mediante intrusión de mercurio deben ser valorados teniendo en cuenta el porcentaje de poros que no llega a cuantificarse con esta técnica, por ser demasiado pequeños o por no estar interconectados. En la bentonita FEBEX este porcentaje puede ser mayoritario, en torno al 67 %.

- El método desarrollado para la determinación de la conductividad hidráulica presenta dificultades experimentales para las densidades secas más altas (a partir de $1,70 \text{ g/cm}^3$), para las que los flujos de agua son muy pequeños y difíciles de medir, lo que se traduce en una mayor dispersión de los datos obtenidos. La relación entre flujo y gradiente hidráulico es lineal para el intervalo de gradientes entre 2800 y 26400 m/m, lo que pone de manifiesto la validez de la ley de Darcy para ese intervalo en la bentonita compactada a densidades secas de entre 1,30 y $1,84 \text{ g/cm}^3$.
- En materiales expansivos el valor de permeabilidad intrínseca para una porosidad dada varía extraordinariamente con el tipo de fluido que se utilice para realizar la determinación, en función de si éste reacciona con la arcilla o no. Por este motivo, los valores de permeabilidad intrínseca de la muestra seca obtenidos con gas son mucho mayores que los obtenidos con agua para la muestra saturada.
- La curva de retención de materiales expansivos depende de las condiciones de confinamiento del material durante la determinación, obteniéndose humedades mayores para una misma succión si se realiza a volumen libre que si la muestra está confinada. Esta diferencia es particularmente notable para las succiones bajas a las que se produce hinchamiento. Por este motivo, cuando se aplican métodos convencionales para la determinación de las curvas de retención de estos materiales, no se obtienen resultados representativos de las condiciones de la bentonita en una barrera de ingeniería, donde se encuentra confinada.
- Aunque se han obtenido buenos resultados en las curvas de retención confinadas determinadas en edómetros con succión controlada, se ha constatado que este método permite cierta variación del volumen de la muestra, que no siempre se detecta. Esto da lugar a que las curvas determinadas así no correspondan a una única densidad, sino a un intervalo de densidades. Por este motivo, se considera que la utilización de las celdas indeformables diseñadas es más ventajosa, tanto por sencillez de uso como por precisión de los resultados obtenidos.
- La determinación de la presión de hinchamiento de materiales muy expansivos en edómetros convencionales presenta dificultades técnicas. Dada la “limitada” capacidad

de carga de estos equipos, es necesario disminuir el diámetro de la pastilla para conseguir las presiones que es necesario aplicar. Esto reduce la representatividad de la muestra, por lo que conviene trabajar con alturas de pastilla de al menos 1,20 cm, aunque se alarguen los tiempos de ensayo. Aún así, se llega frecuentemente a los límites de carga de los equipos, lo que, unido a la poca precisión del método, hace que la dispersión en los valores obtenidos sea elevada, sobre todo para las densidades secas más altas. A esta dispersión puede contribuir también el efecto de la deformación accidental del suelo durante el ensayo sobre el valor de la presión de hinchamiento.

- La determinación de la conductividad hidráulica y de la presión de hinchamiento está condicionada por la forma de preparación de las pastillas: las pastillas compactadas directamente en los anillos de ensayo tienen una densidad más homogénea, mientras que las pastillas talladas a partir de bloques más grandes, introducidas posteriormente en el anillo de ensayo, presentan una densidad más baja en los bordes, debido a que al saturarse rellenan el espacio entre la pastilla y el anillo. Esto da lugar a que la densidad seca global sea más baja que la de la parte central de la pastilla, que es en realidad la que condiciona el flujo y el hinchamiento. Por este motivo, pastillas talladas de la misma densidad media que las pastillas compactadas, tienen conductividades hidráulicas algo inferiores y presiones de hinchamiento mayores. Es necesario tener en cuenta esta observación cuando se aborden estudios en los que se comparen propiedades hidráulicas de muestras preparadas de diferente forma. Por ejemplo, tras el desmantelamiento de los ensayos a gran escala del Proyecto FEBEX, se determinarán la conductividad hidráulica y la presión de hinchamiento de muestras procedentes de los bloques que estuvieron instalados en la barrera. Para realizar los ensayos sobre la muestra inalterada será necesario tallar pastillas del tamaño apropiado a partir de los bloques. Al comparar los resultados obtenidos con los resultados patrón para muestra no tratada, es necesario tenerlo presente, puesto que las propiedades de la muestra no tratada se han determinado sobre pastillas compactadas directamente en los anillos de ensayo.
- El método de control de succión mediante disoluciones de ácido sulfúrico en el ensayo edométrico ha mostrado ser más adecuado para el estudio de este material que el método de control mediante presión de nitrógeno. Esto es debido a que el intervalo de

succión que se puede aplicar mediante este último método es muy pequeño en relación a la succión de la bentonita, por lo que, durante los ensayos realizados en los edómetros con control de succión mediante presión de nitrógeno, sólo se puede investigar el comportamiento de la bentonita en condiciones próximas a la saturación. Además, este método presenta más dificultades experimentales y está más sujeto a averías (rotura de membrana, fugas por el pistón o llave de la celda).

- La fabricación de probetas de bentonita de alta densidad requiere la aplicación de cargas uniaxiales del orden de 20 MPa. Estas cargas son muy superiores al límite de carga de los equipos edométricos usuales (10 MPa). Por esta razón, cuando se trabaja con bentonita compactada a alta densidad en equipos edométricos convencionales, ésta permanece predominantemente dentro del dominio elástico, excepto en los casos en los que se produce un aumento importante de la porosidad de la muestra como consecuencia de su hidratación bajo una carga pequeña, con lo que se reduce la presión de preconsolidación.
- En los ensayos edométricos con control de succión y temperatura se ha observado que se desarrollan en la arcilla poblaciones de bacterias muy numerosas, debido probablemente a la elevada humedad y temperatura. Así mismo, el estudio al microscopio electrónico de algunas muestras de bentonita procedentes de ensayos edométricos con control de succión mediante disoluciones de ácido sulfúrico, ha revelado la presencia de abundantes cristales de yeso de diferentes morfologías, cuyo origen no se ha precisado. Queda por comprobar la influencia que ambos aspectos puedan tener sobre el comportamiento deformacional observado en la arcilla.

CARACTERIZACIÓN TERMO-HIDRO-MECÁNICA DE UNA ARCILLA EXPANSIVA

En esta sección se recogen las características de la bentonita estudiada, tanto en sus aspectos particulares como en aquéllos que son extensibles al resto de arcillas expansivas, a la vez que se da una interpretación al comportamiento observado. La mayor parte de las determinaciones se han realizado con bentonita compactada a densidades secas de entre

1,80 y 1,50 g/cm³, lo que cubre desde la densidad inicial de los bloques compactados para el ensayo en maqueta del Proyecto FEBEX, hasta la densidad de la barrera emplazada una vez saturada, incluso con las variaciones locales esperables.

- La bentonita FEBEX está constituida por esmectita en más de un 90 %. Sin embargo, su plasticidad es relativamente baja ($w_L=102\pm4$ %), así como el porcentaje de partículas inferiores a 2 μm (67 ± 3 %). El estudio al microscopio electrónico ha mostrado que la microestructura más frecuente en la bentonita está constituida por apilamientos de láminas de esmectita que parecen pseudomorfizar granos minerales originales de la roca volcánica. Estos apilamientos, de composición puramente esmectítica, podrían ser responsables de la baja plasticidad y de la granulometría demasiado gruesa para un material arcilloso. El tratamiento mediante ciclos sucesivos de secado y amasado en húmedo parece disgregar esta estructura, dando lugar a valores progresivamente más altos de límite líquido (hasta 172 %), de fracción menor de 1,4 μm (hasta 85 %) y de superficie específica externa (que pasa de 32 a 57 m²/g), lo que indica un aumento del número de superficies reactivas accesibles. Como consecuencia de este cambio microestructural, el material que ha sido ensayado y secado en el laboratorio no debería utilizarse para la realización de nuevos ensayos termo-hidro-mecánicos.
- La bentonita FEBEX compactada con su humedad higroscópica presenta un porcentaje de poros inferiores a 0,006 μm en torno al 67 %, lo que significa que un porcentaje de poros de este orden queda en el dominio de la porosidad intra-agregado (inferior a 0,002 μm). El resto de la porosidad se distribuye en tres familias –identificadas por intrusión de mercurio–, de las cuales la más abundante (18 %) es la de los poros “pequeños”, que en realidad ocupan el dominio de la mesoporosidad. Las familias de poros medianos y grandes forman parte de la macroporosidad. Esta distribución puede sufrir modificaciones en función del grado de saturación. No se han observado modificaciones de esta distribución en función de la densidad seca para el intervalo comprendido entre 1,67 y 1,78 g/cm³.
- Cuando la arcilla se satura a volumen constante, impidiéndose su expansión, el agua que entra adquiere una densidad superior a 1,00 g/cm³, pudiendo llegar a valores de

hasta $1,36 \text{ g/cm}^3$. El valor de la densidad del agua aumenta a medida que disminuye la humedad y, sobre todo, aumenta a medida que lo hace la densidad seca de la arcilla, lo que podría deberse a que la disminución de porosidad dificulta el desarrollo de las dobles capas difusas. Esta hipótesis explica que se obtengan grados de saturación ficticios superiores a 100 % cuando éstos se calculan utilizando el valor de la densidad del agua libre.

Permeabilidad

- El aumento de densidad seca de la muestra produce una disminución exponencial de la permeabilidad saturada (y de la permeabilidad intrínseca), distinguiéndose dos intervalos de comportamiento hidráulico diferente cuya separación viene marcada por el valor de densidad seca $1,47 \text{ g/cm}^3$. El aumento de la conductividad hidráulica al disminuir la densidad es más notable para densidades secas por debajo de este valor, debido a que, al disminuir la capacidad de hinchamiento de la arcilla, aumenta el tamaño de los canales de flujo y, por tanto, su porosidad efectiva y su permeabilidad.
- La conductividad hidráulica aumenta ligeramente (medio orden de magnitud) al utilizar como permeante agua salina en lugar de agua granítica o destilada, especialmente para las densidades bajas.
- La permeabilidad al gas de pastillas compactadas con la misma humedad disminuye también exponencialmente al aumentar la densidad seca, siempre que el grado de saturación se mantenga por debajo de determinado valor umbral (entre 65 y 80 %, dependiendo de la densidad seca). La disminución de la permeabilidad al gas para grados de saturación superiores a este umbral es muy acusada, lo que marca la discontinuidad de la fase gaseosa. Sin embargo, el parámetro que presenta una mejor correlación con el valor de permeabilidad al gas es el volumen de poros accesible ($e(1-S_r)$). Entre ambos puede ajustarse una relación potencial.
- La permeabilidad intrínseca de muestras de igual porosidad varía con el grado de saturación, pudiendo llegar a haber hasta ocho órdenes de magnitud de diferencia entre la muestra seca y saturada. Esto es debido a que el agua provoca una expansión de las

láminas de arcilla que reduce el tamaño de los poros entre agregados. La arcilla hidratada en condiciones confinadas presenta el mismo volumen global de poros que una muestra seca de la misma densidad seca, pero los espacios entre agregados se reducen o eliminan, debido al hinchamiento de las partículas de arcilla. Esta variación en el diámetro medio de los poros disponibles para el flujo explica la gran diferencia en los valores de permeabilidad intrínseca medidos en muestra seca y saturada. Por otra parte, la permeabilidad intrínseca para un mismo grado de saturación es función de la densidad seca de la muestra.

Retención de agua

Se han determinado las curvas de retención de la bentonita compactada en el intervalo de densidad seca 1,60-1,75 g/cm³, en condiciones de confinamiento y de volumen libre, a temperatura de 20 °C. Para las densidades secas de 1,65 y 1,70 g/cm³ se ha determinado la curva de retención a volumen constante a 40 °C. La humedad inicial de la arcilla en todos los casos ha sido la higroscópica.

La succión de la bentonita FEBEX es muy elevada, lo que es una medida de su gran avidez por el agua y de su capacidad de retenerla. Es fundamentalmente de tipo matricial, siendo inapreciable la contribución de la succión osmótica.

El comportamiento de pastillas talladas y compactadas responde a las mismas pautas, por lo que se puede afirmar que el método de preparación de las pastillas no modifica su capacidad de retención.

La capacidad de retención de agua de la arcilla está muy condicionada por su estado de confinamiento. Por este motivo, existen grandes diferencias entre las curvas de retención determinadas a volumen libre y las determinadas en condiciones confinadas. Estas diferencias sólo atañen a las trayectorias, o parte de trayectorias, en que la densidad seca de la muestra es inferior a la inicial, es decir, a las trayectorias de humectación y a parte de las trayectorias humectación tras secado, ya que, una vez que comienza a producirse retracción, ya no se puede hablar de volumen confinado. Los rasgos más significativos del comportamiento en estas dos condiciones son:

- La diferencia entre las humedades alcanzadas para una misma succión a volumen libre y confinado se hace más notable para succiones por debajo de determinado valor, que depende de la densidad seca. Para el intervalo de densidades secas analizado este valor se encuentra entre 30 y 8 MPa. Por encima de estos valores la succión estaría controlada por la microestructura y sería independiente de la densidad seca (succión intra-agregado), y por debajo estaría controlada por la macroestructura (succión inter-agregado).
- Los grados de saturación que alcanzan las muestras confinadas son mayores que los que alcanzan las muestras a volumen libre para la misma succión. De hecho, las muestras confinadas llegan a saturación total, mientras que las ensayadas a volumen libre no. Así, el grado de saturación máximo en las trayectorias a volumen libre está entre 60 y 80 %, dependiendo de la densidad seca.
- La relación succión/humedad determinada a volumen libre puede expresarse mediante una ley logarítmica: la humedad de la muestra disminuye en las trayectorias de secado (aumento de la succión), y aumenta en las trayectorias de humectación (disminución de la succión). A su vez, la modificación de la densidad seca en función de la succión en estas trayectorias sigue una ley potencial, aumentando durante el secado y disminuyendo en la humectación. La influencia de la densidad seca inicial en los valores de humedad y densidad seca alcanzados en cada escalón de succión es pequeña. La repercusión de la densidad seca inicial sobre la humedad alcanzada es más patente a medida que disminuye la succión. Sin embargo, los valores de densidad seca tienden hacia un valor igual a 1 g/cm^3 para succión de 0,1 MPa, independientemente del valor inicial de la densidad seca.
- Por tanto, en el caso de saturación a volumen libre, la capacidad de retención de la arcilla está influida en cierta medida por el tamaño medio de los poros. Cuanto menor es éste, es decir, cuanto mayor es la densidad seca, mayor es la humedad para determinada succión en la trayectoria de hidratación, puesto que habrá mayor volumen de poros con el diámetro al que afecta cada succión. Sin embargo, en el caso de saturación a volumen constante, la capacidad de retención está restringida por la porosidad total. Por ello, cuanto mayor es la densidad seca, menor es la

humedad que se alcanza para determinada succión, especialmente cuando la muestra se aproxima a la saturación.

- Tanto en las trayectorias de humectación como en las de humectación tras secado a volumen libre, el grado de saturación para una succión dada es mayor para las muestras de mayor densidad seca inicial. Debido a la disminución de densidad que acompaña al aumento de humedad que se produce al disminuir la succión, el grado de saturación se mantiene aproximadamente constante para un intervalo de succión de entre 0,5 y 100 MPa. El valor superior corresponde al punto de salida de aire de la microestructura en las trayectorias de humectación, a partir del cual el agua que entra en la arcilla deja de reemplazar al aire, que ya no sale del material, por lo que se produce un aumento de volumen igual al aumento de volumen de agua y una disminución significativa de la densidad seca. El valor de 0,5 MPa, por debajo del cual sí se produce aumento del grado de saturación, corresponde al inicio de la saturación de los poros mayores de $0,59\ \mu\text{m}$, pertenecientes al dominio de la macroporosidad (poros medianos), y por tanto al punto de salida de aire de la macroestructura. Este último valor no puede identificarse en las curvas determinadas a volumen constante, probablemente porque durante la saturación desaparece la macroporosidad, que es invadida por la expansión de la microporosidad, produciéndose una reducción del tamaño medio de los poros al aproximarse a saturación.
- Por tanto, en arcillas compactadas de cierta expansibilidad a volumen libre, es más adecuado utilizar la humedad que el grado de saturación como variable de estado para determinados intervalos de succión.
- En las trayectorias de humectación tras secado a volumen libre, la humedad alcanzada es ligeramente menor que en las de humectación, aunque la diferencia entre ambos valores disminuye al hacerlo la succión, llegando a invertirse la relación al llegar a los valores de succión más bajos.

- Las curvas de retención a volumen constante presentan histéresis, por lo que la humedad en las trayectorias de humectación es menor que en las de secado que se realizan a continuación.
- El efecto de aumentar la temperatura a 40 °C en las curvas de retención es poco notable, aunque parece apuntar a que, en condiciones confinadas, la capacidad de retención a 40 °C es ligeramente superior que a 20 °C, contrariamente a lo que han observado otros autores en curvas determinadas a volumen libre.

Hinchamiento

La presión de hinchamiento de la bentonita se relaciona con la densidad seca mediante una ley exponencial, sin que se haya identificado la repercusión en ella de la utilización de agua destilada o granítica para saturar la muestra.

En los ensayos de saturación bajo carga, la relación entre la carga vertical y la deformación experimentada por la arcilla al saturarse es de tipo logarítmico, y depende de la densidad seca inicial. Sin embargo, las deformaciones finales no dependen mucho del tipo de agua empleado para saturar (destilada, granítica o salina), aunque para densidad seca inicial de 1,60 g/cm³, las deformaciones finales alcanzadas al saturar con agua destilada son algo mayores. Esta falta de influencia de la salinidad del agua sobre el valor de la deformación puede deberse, por un parte, a que el agua salina utilizada está en equilibrio con la composición mineralógica de la arcilla, y por otra, a que las cargas verticales empleadas son elevadas (entre 0,1 y 3,0 MPa), lo que puede dificultar los procesos osmóticos.

Conductividad térmica

La conductividad térmica a temperatura ambiente de los bloques de arcilla compactados aumenta con la densidad seca y, sobre todo, con la humedad. Para la arcilla seca tiene un valor de 0,57 W/m·K, y para la arcilla saturada de 1,27 W/m·K. La conductividad térmica de la muestra seca es mayor para muestras de mayor densidad seca, mientras que cuando la muestra está saturada, la conductividad térmica es mayor para las muestras de menor densidad seca. Esto es debido a que las muestras de menor densidad seca necesitan mayor

humedad para saturarse, y la humedad tiene mayor repercusión sobre el valor de la conductividad térmica que la densidad seca.

Anisotropía

Los bloques compactados no muestran anisotropía respecto a la conductividad hidráulica, a la presión de hinchamiento ni a la capacidad de retención. Es decir, estas propiedades presentan valores análogos cuando se determinan en la dirección paralela al esfuerzo de compactación o en la dirección perpendicular. Esta observación apunta a que durante la fabricación de los bloques no se produce una reorganización de las partículas laminares, probablemente porque el proceso de compactación es muy rápido y porque tiene lugar en ausencia de agua libre, ya que el material se compacta con su humedad higroscópica. Además, la esmectita, constituyente mayoritario de la bentonita, es un mineral cuyos cristales tienen forma irregular y por tanto, baja capacidad de reorientación. La relativa variedad de la distribución granulométrica (con un 22 % de fracción limo) también es un obstáculo a la orientación de las partículas. En cualquier caso, al saturarse la muestra durante las determinaciones, la microestructura tendería a homogeneizarse. La conductividad térmica tampoco muestra una anisotropía notable, a pesar de que su medida no se realiza necesariamente con la muestra saturada. Además, la pequeña anisotropía observada en los valores de conductividad térmica disminuye con el aumento de humedad de la muestra.

Deformabilidad en condiciones no saturadas

Los ensayos edométricos realizados tienen la particularidad de haber abarcado un intervalo de succiones muy amplio, desde 0 hasta 500 MPa, con lo que han explorado prácticamente todos los estados de hidratación de la bentonita. En la literatura apenas aparecen datos experimentales referidos a succiones tan elevadas. En los ensayos presentados en este trabajo se ha puesto de manifiesto que el comportamiento deformacional de la bentonita está dominado por su microestructura, y por la repercusión de las deformaciones de ésta sobre la macroestructura.

El secado de la muestra por reducción de la succión hasta valores próximos a 500 MPa –lo que supone una disminución de humedad hasta valores cercanos al 4 %– no conlleva prácticamente variación de volumen, aunque el índice de poros disminuye al aumentar la succión según una relación logarítmica que es función de la densidad seca. Esta pequeña variación de volumen con el secado a partir de 120 MPa parece indicar que por debajo de este valor de succión debe de estar el punto de entrada de aire, es decir, el valor a partir del cual, la pérdida de volumen de agua debida al secado es compensada por la entrada de un volumen de aire semejante, con lo que la pérdida de humedad no se traduce en pérdida de porosidad total. Además, para succiones por encima de este valor, la carga externa tampoco produce consolidación importante en la muestra, que se hace rígida.

Así mismo, el secado de la muestra por aumento de la succión hasta 500 MPa no modifica su capacidad de hinchamiento durante la hidratación posterior, ni tampoco su presión de hinchamiento una vez saturadas. Al contrario, la reducción de la succión produce mayor deformación en la muestra cuanto mayor es el valor de succión inicial, por lo que las muestras sometidas a secado pueden llegar a hinchar más, como predicen los modelos de comportamiento microestructural.

Las deformaciones por hinchamiento aumentan al llegar a los valores más bajos de succión.

La variedad de ensayos realizados ha permitido poner de manifiesto la repercusión que el tipo de trayectoria tiene sobre el valor final de la deformación, así como sobre la reversibilidad de ésta. Cuando la muestra se hidrata bajo una carga vertical baja, el índice de poros aumenta mucho, y la carga vertical que se aplica posteriormente no puede contrarrestar este hinchamiento, es decir, la deformación inducida es irreversible. Sin embargo, si se impide el hinchamiento durante la saturación, cargando la muestra previamente o simultáneamente, el cambio final de volumen es más pequeño. Incluso, si la hidratación de la muestra se produce a partir de una saturación pequeña y bajo una sobrecarga importante, la muestra puede experimentar un pequeño colapso reversible. La influencia de la trayectoria sobre los valores finales de deformación es también importante después de un secado intenso. Este comportamiento es un ejemplo de la deformación macroscópica irreversible inducida por el hinchamiento microestructural. El cambio de

volumen durante la hidratación –cuya componente es mayoritariamente microestructural–, disminuye de intensidad cuanto mayor es la sobrecarga bajo la que se realiza. En concreto, se ha encontrado una ley logarítmica que relaciona la variación de volumen debida al cambio de succión con la sobrecarga. Esta expansión de la microestructura por hidratación bajo una carga pequeña da lugar a una reorganización de la macroestructura, que se hace más porosa, produciéndose un aumento de volumen plástico y, por tanto, irreversible. La carga posterior aplicada en los ensayos no ha sido suficiente para contrarrestarlo.

Durante esta expansión microestructural se produce también una disminución de la presión de preconsolidación, que se hace menor cuanto menor es la densidad seca alcanzada durante la hidratación, lo que a su vez está en relación con la sobrecarga bajo la que ésta se ha producido y con la intensidad de la hidratación, es decir, con el valor hasta el que la succión ha disminuido durante ella. Por tanto, la presión de preconsolidación disminuirá más durante la hidratación cuanto menor sea la sobrecarga bajo la que ésta se produce y cuanto mayor sea el grado de saturación alcanzado. Se ha determinado el valor de la presión de preconsolidación para diferentes succiones, encontrándose valores desde los 20 MPa, correspondientes a la presión de fabricación de la pastilla, hasta 1 MPa.

La importancia de la trayectoria de esfuerzos en el valor de la deformación final que se ha señalado en los párrafos anteriores, pone de manifiesto que el análisis del comportamiento de materiales muy expansivos no puede llevarse a cabo mediante superficies de estado, ya que éstas serían diferentes incluso en el caso de deformaciones monotónicas (sólo aumento o sólo disminución de volumen), dependiendo de la secuencia e intensidad de las tensiones aplicadas (carga y succión). Para modelizar correctamente el comportamiento de la bentonita compactada, en el caso de trayectorias arbitrarias de cambio de carga y de succión, es necesario utilizar modelos de tipo elasto-plástico que incorporen la interacción entre la microestructura y la macroestructura del suelo.

La deformabilidad por aumento de carga disminuye para succiones altas, y especialmente en el caso de muestras sobreconsolidadas.

La presión de hinchamiento de la muestra no saturada aumenta de forma logarítmica en el intervalo de succión comprendido entre los 130 MPa (la succión correspondiente a la humedad higroscópica) y los 10 MPa, pero por debajo de este valor el aumento se atenúa,

probablemente porque para succiones inferiores la muestra confinada está prácticamente saturada, y porque se compensan las deformaciones por hinchamiento microestructural con las deformaciones por colapso macroestructural. En todo este intervalo de succión la presión de hinchamiento es función de la densidad seca, siendo mayor cuanto mayor es ésta. Por otra parte, para succiones superiores a los 200 MPa apenas se desarrolla presión de hinchamiento.

El aumento de la temperatura hasta 80 °C en los ensayos edométricos con succión controlada parece inducir una rigidificación del material, aumentando su presión de preconsolidación y limitando su capacidad de hinchamiento.

Cuando se realiza la descarga de la muestra saturada de forma rápida y escalonada, el aumento del índice de poros al disminuir la carga es logarítmico y función de la densidad seca al comienzo de la descarga. Los índices de hinchamiento obtenidos en estas descargas son muy altos, un 50 % menores que los índices de compresión.

LA BENTONITA COMO BARRERA DE INGENIERÍA

La bentonita, instalada en el almacenamiento en forma de bloques de elevada densidad, fabricados mediante compactación uniaxial del granulado de arcilla con su humedad higroscópica, tiene fundamentalmente una succión muy elevada y, por tanto, una gran avidez por el agua. Esto será el motor fundamental de la saturación de la barrera a partir del agua proveniente del macizo circundante. Pero, a medida que la arcilla se va saturando, su permeabilidad intrínseca disminuye, al disminuir el tamaño de los canales de flujo, a la vez que disminuye el gradiente de succión, que es el responsable del flujo de agua, por lo que el proceso de saturación será progresivamente más lento. Esta disminución en el flujo sólo se verá en parte compensada por el aumento de la permeabilidad relativa al aumentar la saturación.

Simultáneamente a la hidratación tiene lugar la expansión de la bentonita en aquellos lugares donde existe espacio para ello. De esta manera, el hinchamiento y la elevada succión de la bentonita impiden también que las juntas entre bloques se conviertan en

canales preferentes para el flujo de agua, puesto que el agua que entra en contacto con la bentonita es inmediatamente absorbida, provocando su expansión y el sellado de cualquier tipo de grieta. Así mismo, el hueco entre los bloques de bentonita y la pared de la galería se cerrará por este mismo proceso. En las zonas donde la bentonita está confinada, la presión de hinchamiento ejercida por la arcilla irá aumentando con la saturación de forma logarítmica, con lo que se produce la compresión de las zonas más secas y el aumento de su densidad, según se describe en la sección “LA BENTONITA EN LAS CONDICIONES DEL ALMACENAMIENTO”.

Los ensayos edométricos con succión controlada han mostrado que durante la hidratación de la bentonita compactada pueden tener lugar deformaciones irreversibles, que son mayores cuanto menor es la sobrecarga. En la barrera, por estar confinada, la sobrecarga sobre la bentonita será siempre importante, por lo que no es previsible que se produzcan deformaciones irreversibles durante la hidratación, excepto en las juntas entre bloques y en la periferia, donde el espacio entre la bentonita y la roca puede ser suficiente para permitir la expansión libre de la arcilla. De esta manera, quedaría un anillo exterior en el que la bentonita tendría una densidad seca menor —que ya no se recuperaría— y una humedad más elevada. Este anillo podría constituir un aprovisionamiento de agua y aseguraría su reparto homogéneo sobre toda la superficie de la barrera.

Por otra parte, el secado de la bentonita que tiene lugar en las proximidades del contenedor debido al aumento de la temperatura, siempre que no produzca una reducción de su humedad por debajo del 4-6 %, no producirá en ella una reducción de volumen significativa, puesto que por encima de la succión correspondiente a la humedad higroscópica, la muestra se hace muy rígida. Esto impedirá que la formación de grietas de retracción y canales de flujo preferentes sea importante.

La elevada succión generada por el secado, al aumentar los gradientes hidráulicos, puede acelerar la llegada del agua a las partes internas de la barrera. Se ha comprobado que el secado hasta humedades del 4-6 % no reduce la capacidad de hinchamiento de la bentonita, por lo que las propiedades hidro-mecánicas del material no se verán alteradas tras el transitorio, y con la llegada del agua se producirá la expansión de la bentonita y el confinamiento del contenedor.

Una vez saturada la barrera, y considerando que la densidad seca del conjunto sea de entre 1,60 y 1,65 g/cm³, la permeabilidad de la barrera estará comprendida entre 10⁻¹³ y 10⁻¹⁴ m/s, y su presión de hinchamiento entre 4 y 10 MPa. El posible aumento de la densidad del agua al entrar en la bentonita compactada, puede ocasionar que el volumen de agua necesario para saturar la barrera sea hasta un 20 % mayor que el previsto al hacer el cálculo considerando la densidad del agua igual a 1,00 g/cm³.

La conductividad térmica de los bloques de bentonita FEBEX saturados –entre 1,2 y 1,3 W/m·K–, es suficiente para favorecer la disipación del gradiente térmico generado por la desintegración del residuo. En cualquier caso, el impacto de la temperatura sobre las propiedades analizadas no parece ser drástico.

INVESTIGACIONES POSTERIORES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo, las dificultades encontradas durante su realización y los conocimientos que son necesarios para evaluar el comportamiento de la bentonita como material de sellado, se estima que las líneas de investigación futuras deberían hacer hincapié en los siguientes aspectos:

- Los análisis de sensibilidad de los modelos sobre el comportamiento a largo plazo de la barrera han mostrado la repercusión de la curva de retención en la estimación de los tiempos de saturación de la barrera. Para reducir las incertidumbres asociadas a esta característica del material deberían determinarse de forma más precisa las curvas de retención de la bentonita a volumen constante y en función de la temperatura. La técnica puesta a punto en las etapas finales de este estudio para determinar la curva de retención a volumen constante mediante celdas indeformables, ofrece la posibilidad de obtener datos más precisos que permitan confirmar algunas hipótesis sobre las características de retención de agua de la bentonita. Así por ejemplo, los límites del dominio de la succión intra e interagregado en función de la densidad seca, los valores de succión exactos a partir de los que la bentonita llega a estar saturada en función de la densidad seca y el alcance de los fenómenos de histéresis.

- Otra propiedad que condiciona fundamentalmente el comportamiento hidráulico de la barrera y el tiempo de saturación es la permeabilidad no saturada de la bentonita. La determinación de este parámetro se aborda de forma indirecta mediante retro-análisis de ensayos de infiltración, es decir, mediante la aplicación de un modelo a un problema bien definido. Dadas las características particulares de esta aproximación, no se ha realizado en este estudio, aunque su conocimiento es prioritario.
- Aunque en este trabajo se ha analizado la repercusión del agua de hidratación en algunas propiedades, el estudio no ha sido sistemático, y se ha reducido a dos tipos de agua (granítica y salina). Se plantea la conveniencia de analizar la influencia de la concentración salina del agua de hidratación en las propiedades hidro-mecánicas de la arcilla. Esta concentración puede llegar a ser grande, debido a la disolución y transporte de sales presentes en la bentonita que el proceso de saturación conlleva.
- Los aspectos térmicos del comportamiento de la bentonita no han sido suficientemente estudiados, debido a la complejidad añadida a las técnicas experimentales. La influencia de la densidad seca y la humedad en la mayoría de las propiedades de la bentonita FEBEX se ha ensayado y se conoce, pero los ensayos se han realizado a temperatura ambiente. Entre las propiedades clave del material de sellado en las que habría que identificar la influencia de la temperatura están la curva de retención, la permeabilidad y la presión de hinchamiento. Como se ha dicho, el conocimiento de las dos primeras es decisivo para la predicción de la velocidad de hidratación de la barrera. Por otra parte, la presión de hinchamiento que el material llegará a desarrollar es uno de los parámetros de diseño del almacenamiento.
- Los estudios sobre el comportamiento termo-hidro-mecánico de la bentonita deben tener siempre presentes los aspectos microestructurales del material, por lo que es conveniente la utilización de técnicas complementarias que permitan explicar las observaciones realizadas, como las determinaciones de porosidad (especialmente mediante adsorción de gases) y los estudios al microscopio óptico y electrónico. El conocimiento de la porosimetría y la superficie específica puede permitir conocer el volumen de agua que puede existir en forma de agua libre o adsorbida, y obtener de

forma indirecta información acerca de la curva de retención y la permeabilidad relativa.

- El conocimiento de la densidad del agua al pasar a formar parte del agua de saturación de la bentonita compactada es clave para determinar el volumen de agua necesario para saturar la barrera de ingeniería, por lo que sería necesario realizar estudios de detalle con las técnicas experimentales apropiadas para intentar confirmar la variación de la densidad del agua con la densidad y humedad del material.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Norma UNE 7045(1952): Determinación de la porosidad de un terreno.

Norma UNE 103-104-93: Determinación del límite plástico de un suelo. *AENOR*..

Norma UNE 103-300-93: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa. *AENOR*..

Norma UNE 103-103-94: Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande. *AENOR*.

Norma UNE 103-302-94: Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo. *AENOR*..

Norma UNE 103-101-95: Análisis granulométrico de suelos por tamizado. *AENOR*.

Norma UNE 103-102-95: Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro. *AENOR*.

AITCHISON, G.D.(1959): The strength of quasi-saturated and unsaturated soils in relation to the pressure deficiency in the pore water. *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found.. Eng.* London. 135-139.

AITCHISON G.D. & MARTIN, R. (1973): A membrane oedometer for complex stress-path studies in expansive clays. *Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils*. Haifa. 161-167.

AITEMIN (1999): Sensors data report (In situ experiment) nº 15. *Informe FEBEX 70-AIT-L-5-21*. Madrid. 160 pp.

ALLEN, T.(1981): Particle size measurement. 3rd. Edition. *Chapman & Hall*. London.

ALONSO, E.E.; GENS, A. & HIGHT, D.W.(1987): Special problem soils. *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found.. Eng.* Dublin. General Report, session 5, pp 5.1-5.60.

ALONSO, E.E.; GENS, A. & JOSA, A.(1990): A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40(3): 405-430.

ARYA, L.M.; LEIJ, F.J.; SHOUSE, P.J. & VAN GENUCHTEN, M. Th.(1999): Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1063-1070.

ARNOLD, M(1984): The genesis, mineralogy and identification of expansive soils. *Proc. 5th Int. Conf. Expansive Soils*. Adelaida. 32-41.

ASTM D2435 (1980): Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Soils. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones, Sect. 4, *ASTM*, Philadelphia, PA.

- ASTM D4546 (1985): Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Potential for Cohesive Soils. Annual Books of ASTM Standards. Vol 04.08. Soil and Rock; Building Stones. Sect. 4, *ASTM*, Philadelphia, PA.
- ASTM D3663-99: Standard Test Method for Surface Area of Catalysts and Catalyst Carriers.
- ASTUDILLO, J.; OLMO, C. DEL; RIVAS, P.; MARTÍN, P.L.; VILLAR, M.V.; PÉREZ DEL VILLAR, L.; PARDILLO, J.; DARDAINE, M. & LAJUDIE, A.(1995): Field test for the demonstration of the emplacement feasibility of clay buffer material as engineered barrier, in crystalline formation. Volume 1, 2 & 3. *Nuclear Science and Technology*. EUR 15692/3. Luxemburgo.
- ATKINSON, J.H. & BRANSBY, P.L.(1977): The mechanics of soils. An introduction to critical state soil mechanics. University Series in Civil Engineering. *McGraw-Hill*. 374 pp.
- BARBOUR, S.L. & FREDLUND, D.G.(1989): Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils. *Can. Geotech. J.* 26: 551-562.
- BEN RHAÏEM, H.; TESSIER, D. & PONS, CH.H.(1986): Comportement hydrique et évolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessiccation-humectacion: Partie I. Cas des montmorillonites calciques. *Clay Minerals* 21:9-29.
- BERNIER, F.; VOLCKAERT, G.; ALONSO, E. & VILLAR, M.V.(1997): Suction-controlled experiments on Boom clay. *Eng. Geol.* 47(4): 325-338.
- BEZIAT, A., DARDAINE, M. & GABIS, V.(1988): Effect of compaction pressure and water content on the thermal conductivity of some natural clays. *Clays and Clay Minerals* 36(5): 462-466.
- BISHOP, A.W. & DONALD, I.B.(1961): The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus. *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mechanics* 1: 13-21. Paris.
- BISHOP, A.W. & BLIGHT, G.E.(1963): Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Géotechnique* 13(3): 177-197.
- BISHOP, A.W. & WESLEY, L.D.(1975): A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Géotechnique* 25(4): 657-670.
- BLACK, W.P.M. & CRONEY, D.(1957): Pore water pressure and moisture content studies under experimental pavements. *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* London. Vol. 2: 94-103.
- BLATZ, J. & GRAHAM, J.(2000): A system for controlled suction in triaxial tests. *Géotechnique* 50(4): 465-469.
- BOCKING, K.A. & FREDLUND, D.G.(1980): Limitations of the axis translation technique. *Proc. 4th Int. Conf. Expansive Soils*. Denver. 117-135.
- BRACKLEY, I.J.(1975): Swell under load. *Proc. 6th Regional Conf. for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 1: 71-79.
- BRANDL, H.(1992): Mineral liners for hazardous waste containment. *Géotechnique* 42(1): 57-65.

- BRUNAUER, S.; EMMET, P.H. & TELLER, E.(1938): Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Amer. Chem. Soc.* 60: 309-319.
- BUCHAN, G.D.(1991): Soil temperature regime. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E.(eds.): *Soil Analysis. Physical Methods. Dekker. New York.* 551-612.
- BURDINE, N.T.(1953): Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Petr. Trans. Am. Inst. Mining Metall. Eng.* 198: 71-77.
- CABALLERO, E.; REYES, E.; LINARES, I. & HUERTAS, F.(1985): Hydrothermal solutions related to bentonite genesis, Cabo de Gata region, Almería, SE Spain. *Minerl. Petrogr. Acta* 29A:187-196.
- CHEN, F.H.(1988): Foundations on Expansive Soils. *Developments in Geotechnical Engineering* 12. Elsevier. Amsterdam. 280 pp.
- COLEMAN, J.D. & MARSH, A.D.(1961): An investigation of the pressure membrane method for measuring the swelling properties of soils. *J. Soil Sci.* 12: 343-362.
- COREY, A.T.(1957): Measurement of air and water permeability in unsaturated soil. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* 21(1): 7-10.
- CRONEY, D.(1952): The movement and distribution of water in soils. *Géotechnique* 3(1): 1-16.
- CRONEY, D. & COLEMAN, J.D.(1960): Pore pressure and suction in soil. In: Pore pressure and suction in soils conf. *Butterworths. Londres.* pp 31-37.
- CUADROS, J.; HUERTAS, F.; DELGADO, A. & LINARES, J.(1994): Determination of hydration (H_2O^-) and structural (H_2O^+) water for chemical analysis of smectites. Application to Los Trancos smectites, Spain. *Clay Minerals* 29: 297-300.
- CUÉLLAR, V.(1978): Análisis crítico de los métodos existentes para el empleo de arcillas expansivas en obras de carretera y recomendaciones sobre las técnicas para su uso habitual en España. *Laboratorio de Transporte y Mecánica de Suelo.* Madrid. 321 pp.
- CUEVAS, J.(1992): Caracterización de esmectitas magnéticas de la Cuenca de Madrid como materiales de sellado. Ensayos de alteración hidrotermal. ENRESA. Publicación Técnica N° 04/92. Madrid. 183 pp.
- CUEVAS, J.; VILLAR, M.V.; MARTÍN, M.; COBEÑA, J.C.; LEGUEY, S. & RIVAS, P.(1999): Thermo-hydro-geochemical tests in small cells. CIEMAT/DIAE/54111/4/99. FEBEX report 70-IMA-M-0-5. Madrid. 44 pp.
- CUI, Y.J.(1993): Etude du comportement d'un limon compacté non-saturé, et de sa modélisation dans un cadre élasto-plastique. *Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.* París.
- DANIEL, D.E.(1982): Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46(6): 1125-1129.
- DELAGE, P.(1987): Aspects du comportement des sols non saturés. *Revue Française de Géotechnique* 40: 33-43.

- DELAGE, P.(1993): Experimental techniques. In: Unsaturated soils – Recent developments and applications. *CEEC Course*, Barcelona, June 15-17.
- DELAGE, P.; SURAJ DE SILVA, G.P.R. & DE LAURE, E.(1987): Un nouvel appareil triaxial pour les sols non-saturés. *Proc. 9th European Conf. Soil Mech. Found.Eng.* Dublin. Vol 1: 25-28.
- DELAGE, P.; SURAJ DE SILVA, G.P.R. & VICOL, T.(1992): Suction controlled testing of non saturated soils with an osmotic consolidometer. *Proc. 7th Int. Conf. On Expansive Soils.* Dallas. 260-211.
- DELAGE, P.; HOWAT, M.D. & CUI, Y.J.(1998): The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Eng. Geol.* 50: 31-48.
- DELGADO, A.(1993): Estudio isotópico de los procesos diagenéticos e hidrotermales relacionados con la génesis de bentonitas (Cabo de Gata, Almería). *Tesis Doctoral*. Universidad de Granada. 413 pp.
- DIAMOND, S.(1970): Pore size distribution in clays. *Clays and Clay Minerals* 18: 7-23.
- DINEEN, K.(1997): The influence of soil suction on compressibility and swelling. *Ph. D. Thesis*. Univ. of London.
- DINEEN, K. & BURLAND, J.B.(1995): A new approach to osmotically controlled oedometer testing. In: ALONSO, E.E. & DELAGE, P.(eds.): *Unsaturated Soils. Balkema*. Rotterdam.
- DIRKSEN, C.(1991): Unsaturated hydraulic conductivity. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E.(eds.): *Soil Analysis. Physical Methods. Marcel Dekker*, New York.
- ECHAGÜE, G. et al.(1989): Tratamiento y gestión de residuos radiactivos. *Ilustre Colegio Oficial de Físicos*. Madrid. 248 pp.
- ENRESA (1994): Almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos de alta actividad (AGP). Conceptos preliminares de referencia. *Publicación Técnica ENRESA 07/94*. Madrid. 60 pp.
- ENRESA (1995): Almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos de alta actividad (AGP). Diseños conceptuales genéricos. *Publicación Técnica ENRESA 11/95*. Madrid. 105 pp.
- ENRESA (1997): FEBEX. Etapa preoperacional. Informe de síntesis. *Publicación Técnica ENRESA 9/97*. Madrid. 189 pp.
- ENRESA (1998): FEBEX. Bentonita: origen, propiedades y fabricación de bloques. *Publicación Técnica ENRESA 04/98*. Madrid. 146 pp.
- ENRESA (2000): FEBEX Poject. Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock. Final Report. *Publicación Técnica ENRESA 1/2000*. Madrid. 354 pp.
- ESCARIO, V. (1965): International Panel Report “Engineering effects of moisture changes in soils”. *Concluding Proc. Int. Research and Engineering Conf. Expansive Clay Soils*. Texas A & M Univ.

- ESCARIO, V.(1967): Measurement of the swelling characteristics of a soil fed with water under tension. Int. Cooperative Research on the Prediction of Moisture Content under Road Pavements. *OCDE Working Group*. Madrid meeting.
- ESCARIO, V.(1969): Swelling of soils in contact with water at a negative pressure. *Proc. 2nd Int. Conf. Expansive Clay Soils*. Texas A & M Univ. pp 207-217.
- ESCARIO, V. (1980): Suction controlled penetration and shear tests. *Proc. 4th Int. Conf. Expansive Soils II*: 781-797. Denver.
- ESCARIO, V. & SÁEZ, J.(1973): Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction. *Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils 2*: 195-200. Haifa.
- ESCARIO, V. & SÁEZ, J.(1986): The shear strength of partly saturated soils. *Géotechnique* 36(3): 453-456.
- ESTEBAN, F.(1990): Caracterización experimental de la expansividad de una roca evaporítica. Identificación de los mecanismos de hinchamiento. *Tesis Doctoral*. Universidad de Cantabria. 395 pp.
- ESTEBAN, F. & SÁEZ, J.(1988): A device to measure the swelling characteristics of rock samples with control of the suction up to very high values. *ISRM Symposium on Rock Mechanics and Power Plants 2*. Madrid.
- EUROPEAN COMMISSION (1995): Community's research and development programme on radioactive waste management and storage. Shared-cost action (1990-1994). *Nuclear science and technology series*. EUR 16548. Luxemburgo. 680 pp.
- EVERETT, D.H. & HAYNES, J.M.(1973): Capillarity and Porous Materials: Equilibrium Properties. *Colloid Science* 1: 123-172.
- FERNÁNDEZ SOLER, J.M.(1992): El volcanismo calco-alcalino de Cabo de Gata (Almería). *Tesis Doctoral*. Universidad de Granada. 243 pp.
- FERNÁNDEZ, A.M. & CUEVAS, J.(1998): Estudios del agua intersticial de la arcilla FEBEX. *Informe CIEMAT. Informe FEBEX 70-IMA-L-9-44*. Madrid. 40 pp.
- FERNÁNDEZ, A.M.; RIVAS, P. & CUEVAS, P.(1999): Estudio del agua intersticial de la arcilla FEBEX. *Informe CIEMAT. Informe FEBEX 70-IMA-L-0-44*. Madrid. 144 pp.
- FREDLUND, D.G. & HASAN, J.U.(1979): One-dimensional consolidation theory: unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 16:521-531.
- FREDLUND, D.G. & MORGENSTERN, N.R.(1977): Stress state variables for unsaturated soils. *J. Soil Mech. and Foundation Eng. A.S.C.E.* GT5: 447-466.
- FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H.(1993): Soil Mechanics for Unsaturated Soils. *John Wiley & Sons*. New York. 517 pp.
- FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R. & WIDGER, R.A.(1978): The shear strength of unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 15(3): 313-321.

- FREDLUND, D.G.; SATTler, P.J. & GAN, J.K.-M.(1992): *In situ* suction measurements using thermal sensors. *Proc. 7th Int. Conf. On Expansive Soils*: 325-330.
- GARDNER, R.(1956): Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 20: 317-320.
- GEHLING, W.Y.Y.(1994): Suelos expansivos. Estudio experimental y aplicación de un modelo teórico. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- GENESTE, PH.; RAYNAL, M.; ATABEK, R; DARDAINE, M. & OLIVER, J.(1990): Characterization of a French clay barrier and outline of the experimental programme. *Engineering Geology* 28: 443-454.
- GENS, A. & ALONSO, E.(1992): A framework for the behaviour of unsaturated clay. *Canadian Geotech. J.* 29:1013-1032.
- GENS, A.; ALONSO, E.E. & JOSA, A.(1979): Elastoplastic modelling of partially saturated soils. *Proc. 3rd Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics*, Niagara Falls, 163-170.
- GILI, J.A.(1987): Modelo microestructural de medios granulares no saturados. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- GMITRO & VERMEULEN (1964): *An I. Ch. E. J.* 10(5):740
- GOGUEL, J.; CANDÈS, P. & IZABEL, C.(1987): Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques. Critères techniques de choix de site. *Rapport du groupe de travail présidé par le professeur Goguel*. Ministère de l'Industrie, des P. & T. et du Tourisme. 245 pp.
- GRIM, R.E.(1968): Clay Mineralogy. 2nd ed. *McGraw-Hill Book Company*. New York. 596 pp.
- GÜVEN, N.(1990): Longevity of bentonite as buffer material in a nuclear-waste repository. *Engineering Geology* 28(3-4): 233-248.
- HAJTINK, B. & DAVIES, C.(comp.)(1998): *In situ* testing in underground research laboratories for radioactive waste disposal – Proceedings of a Cluster seminar held in Alden Biessen, Belgium, 10-11 December 1997. *Nuclear Science and Technology*. EUR 18323. Luxemburgo. 339 pp.
- HILF, J.W.(1956): An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils. *US Bureau of Reclamation Tech. Memo*. 654. Denver.
- HOLTZ, W.G. & GIBBS, H.J.(1956): Engineering properties of expansive clays. *Transactions ASCE* 121: 641-677.
- HUECKEL, T. & PEANO, A.(1996): Thermomechanics of Clays and Clay Barriers, 3rd. International Workshop on Clay Barriers, ISMES, Bergamo, Italy, October 22-23, 1993 – Introduction. *Eng. Geol.* 41 (1-4): 1-4.
- HURLBUT, C.S. & KLEIN, C.(1982): Manual de mineralogía de Dana. 3^a ed. *Reverté*. Barcelona. 564 pp.

- ISSC (1965): Review panel: Engineering concepts of moisture equilibria and moisture changes in soil. *Proc. Symp. Moisture equilibria and moisture change in soils beneath covered areas*. Butterworths: 7-21.
- JACKSON, R.D. & TAYLOR, S.A.(1965): Heat Transfer. In: BLACK, C.A. (ed): *Methods of soil analysis*. Agronomy Series 9. *American Society of Agronomy*. Madison.
- JENNINGS, J.E.B. & BURLAND, J.B.(1962): Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Géotechnique* 12(2): 125-144.
- JIMÉNEZ, J.A. & JUSTO, J.L., de(1971): Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas. *Ed. Rueda*. Madrid. 422 pp.
- JIMÉNEZ, J.A. & SERRATOSA, J.M.(1953): Compressibility of clays. *3er Congreso Internacional de Mecánica de Suelos* vol. 1: 192-198. Zürich.
- JOSA, A.C.(1988): Un modelo elastoplástico para suelos no saturados. *Tesis Doctoral*. ETSICCP. Universidad Politécnica de Cataluña.
- JOSA, A.; ALONSO, E.E.; LLORET, A. & GENS, A.(1987): Stress-strain behaviour of partially saturated soils. *Proc. 9th Europ. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* Dublin. 561-564.
- JUSTO, J.L.; DELGADO, A. & RUIZ, J.(1984): The influence of stress-path in the collapse-swelling of soils at the laboratory. *Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils*, Adelaida. 67-71.
- KÄRNBRÄNSLEHANTERING, S.(1999): Äspö Hard Rock Laboratory. Annual Report 1998. *SKB Technical Report* TR-99-10. Estocolmo. 165 pp.
- KARNLAND, O.(1996): Äspö Hard Rock Laboratory. Test plan for long term tests of buffer material. *Progress Report* HRL-96-22. *SKB*. Estocolmo. 34 pp.
- KASSIFF, G. & BEN SHALOM, A.(1970): Apparatus for measuring swell potential under controlled moisture intake. *A.S.T.M. Jnl. Mater.* 5(4): 3-15.
- KASSIFF, G. & BEN SHALOM, A.(1971): Experimental relationship between swell pressure and suction. *Géotechnique* 21(3): 245-255.
- KEELING, P.S.(1961): The examination of clays by IL/MA. *Trans. Brit. Ceram. Soc.* 60: 217-244.
- KHEMISSA, M.(1992): Mesure de la perméabilité des argiles sous contrainte et température. *Revue Française de Géotechnique* 82(1): 11-22.
- KIRKHAM, D.(1946): Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 11:93-99.
- KLUTE, A. (1965): Laboratory measurements of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C.A.(Ed.): *Methods of Soil Analysis. Agronomy Series n. 9. American Society of Agronomy, Inc.* pp 210-221.
- KLUTE, A. & DIRKSEN, C.(1986): Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: KLUTE, A.(ed.): *Methods of Soil Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods. Am. Soc. Agron.* 2nd ed. Madison.

- KOMORNIK, A. & ZEITLEN, J.G.(1965): An apparatus for measuring the lateral soil pressure in the laboratory. *Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.* Mexico. Vol. 1: 141-148.
- KOMORNIK, A.; LIVNEH, N. & SMUCHA, S.(1980): Shear strength and swelling of clays under suction. *Proc. 4th Int. Conf. Expansive Clays*. Denver. Vol. 1: 206-226.
- KOOL, J.B.; PARKER, J.C. & VAN GENUCHTEN, M. Th.(1985): Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation, 1. Theory and numerical studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1348-1354.
- KRAHN, J. & FREDLUND, D.G.(1972): On total, matric and osmotic suction. *Soil Science* 114(5): 339-348.
- KRAZYNSKI, L.M.(1973): The need for uniformity in testing of expansive soils. *Proc. Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction*. Vol. 1. 98-128.
- KYOTO ELECTRONICS Manufacturing Co.(1987): Kemtherm QTM-D3 Quick Thermal Conductivity Meter Instruction Manual.Tokyo. 19 pp.
- LAJUDIE, A.(1986): Mesure et analyse d'identification et de caractérisation de l'argile de Fourge-Cahaignes. *N.T. SESD/87.31*. CEA-Fontenay-aux-Roses. Paris.
- LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V.(1979): Soil Mechanics. *Wiley*. New York. 553 pp.
- LAWRENCE, G.P., PAYNE, D. & GREENLAND, D.J.(1979): Pore size distribution in critical pint and freeze dried aggregates from clay subsoils. *J. Soil Sci.* 30: 499-516.
- LEONE, G.; REYES, E.; CORTECCI, G.; POCHINI, A. & LINARES, J.(1983): Genesis of bentonites from Cabo de Gata, Almería, Spain: a stable isotope study. *Clay Minerals* 18: 227-238.
- LIDE, D.R.(1995): CRC Handbook of Chemistry and Physics. 75th ed. *CRC Press*.
- LINARES, J. et al.(1993): Investigación de bentonitas como materiales de sellado para almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad. *Publicación Técnica ENRESA* 01/93. Madrid. 324 pp.
- LINARES, J. et al.(1996): Alteración hidrotermal de las bentonitas de Almería. *Publicación Técnica ENRESA* 06/96. Madrid. 151 pp.
- LLORET, A.(1982): Comportamiento deformacional del suelo no saturado bajo condiciones drenadas y no drenadas. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- LLORET, A. & ALONSO, E.(1980): Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour. *Géotechnique* 30(4): 449-477.
- LUIS Y LUIS, P.(1990): Determinación de propiedades físico-químicas de materiales cerámicos. *Informe Final*. UCM. Depto. de Ingeniería Química. Madrid. 208 pp.
- LYTTON, R.L.(1967): Isothermal water movement in clay soils. *Ph. D. Dissertation*. University of Texas. Austin. 231 pp.

- MARSHALL, T.J.(1958):A relation between permeability and size distribution of pores. *J. Soil Science* 9:1-8.
- MARTIN, R.T.(1962): Adsorbed water on clay: a review. *9th Nat. Conf. On Clays and Clay Minerals*. Pergamon. Oxford. pp 28-70.
- MARTÍN, P.L.(1999): Ensayo en maqueta: informe final. Instalación y operación. Versión 0. *Informe CIEMAT. Informe FEBEX 70-IMA-M-9-4*. Madrid.
- MARTÍN, P.L. & DARDAINE, M.(1990): Resultados preliminares de compactación uniaxial industrial sobre dos bentonitas españolas seleccionadas: MAC-C de la Cuenca de Madrid y S-2 de la zona de Almería. Resultados de la Fase I. Contrato CEA/ENRESA A2845. *Rapport Technique RDD 98/17*. 57 pp.
- MARTÍN, P.L.; DARDAINE, M. & LAJUDIE, A.(1990): Resultados de compactación uniaxial industrial sobre una bentonita española seleccionada: S-2 de la zona de Almería. Resultados de la Fase I. Contrato CEA/ENRESA A2845. *Rapport Technique DSD 90/18*. 53 pp.
- MATYAS, E.L.(1967): Air and water permeability of compacted soils. In: *Permeability and Capillary of Soils. ASTM STP 417*. 160-175.
- MATYAS, E.L. & RADHAKRISHNA, H.S.(1968): Volume change characteristics of partially saturated soils. *Géotechnique* 18: 432-448.
- McNEAL, B.L. & COLEMAN, N.T.(1966): Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 308-317.
- MEYER, D. & HOWARD, J.J.(eds.)(1983): Evaluation of clays and clay minerals for application to repository sealing. *Technical Report ONWI-486*. DE83 017788. DOE. 180 pp.
- MICROMERITICS (1985): Instruction Manual Poresizer 9310. V 1.00. Norcross, GE.
- MILLINGTON, R.J. & QUIRK, J.P.(1961): Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* 57: 1200-1206.
- MINGARRO, M; RODRÍGUEZ, V. & GARCÍA BACHILLER, J.(1997): Estudios microbiológicos de la arcilla FEBEX. *Informe CIEMAT/IMA/54223/4/00. Informe FEBEX 70-IMA-L-0-68*. Madrid.
- MINGARRO, E.; RIVAS, P.; VILLAR, L.P. del; CRUZ, B. de la; GOMEZ, P.; HERNANDEZ, A.; TURRERO, M.J.; VILLAR, M.V.; CAMPOS, R.; COZAR, J.(1991): Characterization of clay (bentonite)/crushed granite mixtures to build barriers against the migration of radionuclides: diffusion studies and physical properties. Task 3-Characterization of radioactive waste forms. A series of final reports (1985-1989)-No.35. *Nuclear science and technology series. Commission of the European Communities*. Luxembourg. 136 pp.
- MITCHELL, J.K.(1976): Fundamentals of soil behavior. *John Wiley & Sons, Inc*. New York. 422 pp.
- MOORE, D.M. & REYNOLDS, R.C.(1989): Identification of mixed-layered clay minerals. In: X Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. *Oxford University Press*. pp 202-240.

- MUALEM, Y.(1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522.
- MULTON, J.-L.; BIZOT, H. & MARTIN, G.(1981): Eau (teneur, activité, absorption, propriétés fonctionnelles)-humidités relatives. In: DEYMIÉ, B.; MULTON, J.-L. & SIMON, D.(coord.): *Tecnicas d'analyse et de contrôle dans les industries agroalimentaires. Sciences et Techniques Agro-alimentaires* 4: 1-60. Technique et Documentation. *Apria*.
- NAVARRO, V.(1996): Modelo de comportamiento mecánico e hidráulico de suelos no saturados en condiciones no isothermas. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- NEERDAEL, B.; MEYNENDONCKX, P. & VOET, M.(1992): The Bacchus backfill experiment at the Hades underground research facility at Mol, Belgium. Final Report. *Nuclear Science and Technology Series. EUR* 14155. Luxemburgo, 62 pp.
- NEWMAN, A.C.D. & BROWN, G.(1987): The chemical constitution of clays. In NEWMAN, A.C.D.(ed.): *Chemisty of clays and clay minerals. Mineralogical Society Monograph* 6. Longman Scientific & Technical.
- OLPHEN, M. & FRIPIAT, J.J.(1979)(eds.): Data Handbook for Clay Materials and Other Non-metallic Minerals. *Pergamon Press*. 203-216.
- OLSEN, H.W.(1962): Hydraulic flow through saturated clays. *9th Nat. Conf. On Clays and Clay Minerals. Pergamon*. Oxford. pp 170-182.
- PEREZ DEL VILLAR, L.(1989a): Caracterización mineralógica y geoquímica de algunas muestras de bentonita procedentes de la Cuenca terciaria de Madrid (Yuncos, Toledo). *Informe CIEMAT*. Madrid. 29 pp.
- PEREZ DEL VILLAR, L.(1989b): Caracterización mineralógica y geoquímica de algunas muestras de bentonita procedentes de la provincia de Almería. *Informe CIEMAT*. Madrid. 29 pp.
- PEREZ DEL VILLAR, L.; de la CRUZ, B. & COZAR, J.S.(1991): Estudio mineralógico, geoquímico y de alterabilidad de las arcillas de Serrata de Níjar (Almería) y del Cerro del Monte (Toledo). *Informe CIEMAT*. Madrid. 51 pp.
- PINTADO, X.; LEDESMA, A. & LLORET, A.(1998): Backanalysis of thermohydraulic bentonite properties from laboratory tests. *Int. Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research*. Barcelona.
- POUSADA, E.(1984): Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada. Tesis doctoral. *Cuadernos de investigación* C8. *CEDEX*. Madrid. 274 pp.
- PROST, R.; KOUTIT, T.; BENCHARA, A. & HUARD, E.(1998): State and location of water adsorbed on clay minerals: consequences of the hydration and swelling-shrinkage phenomena. *Clays and Clay Minerals* 46(2): 117-131.
- PUSCH, R.(1979): Highly compacted sodium bentonite for isolating rock-deposited radioactive waste products. *Nuclear Technology* 45: 153-157.
- PUSCH, R.(1985): Final Report of the Buffer Mass Test - Volume III: Chemical and physical stability of the buffer materials. *Stripa Project* 85/14. *SKB*. Stockholm. 65 pp.

- PUSCH, R.(1994): Waste disposal in rock. *Developments in Geotechnical Engineering* 76. Elsevier. Amsterdam. 490 pp.
- PUSCH, R. & BÖRGESSON, L.(1985): Final Report of the Buffer Mass Test - Volume II: Test results. *Stripa Project 85/12. SKB*. Stockholm. 195 pp.
- PUSCH, R.& GRAY, M.N.(1989): Sealing of radioactive waste repositories in crystalline rock. *OECD-NEA/CEC Workshop "Sealing of Radioactive Waste Repositories"*. Braunschweig.
- PUSCH, R.; KARNLAND, O. & HÖKMARK, H.(1990): GMM -A general microstructural model for qualitative and quantitative studies on smectite clays. *SKB Technical Report 90-43*. 94 pp.
- PUSCH, R.; MUURINEN, A.; LEHIKONEN, J.; BORS, J. & ERIKSEN, T.(1999): Microstructural and chemical parameters of bentonite as determinants of waste isolation efficiency. Final report. *Nuclear science and technology series. EUR 18950*. Luxemburgo. 121 pp.
- PUSCH, R.; NILSSON, J. & RAMQVIST, G.(1985): Final Report of the Buffer Mass Test – Volume I: scope, preparative field work, and test arrangement. *Technical Report Stripa Project 85-11. SKB, Estocolmo*. 190 pp.
- RICHARDS, L.A.(1941): A pressure membrane extraction apparatus for soil suction. *Soil Science* 51: 377-386.
- RICHARDS, B.G. (1965): A thermistor hygrometer for the direct measurement of the free energy of soil moisture. CSIRO Soil Mechanics Section. *Technical Report N°5*. Melbourne.
- RICHARDS, B.G. (1967): Moisture flow and equilibria in unsaturated soils for shallow foundations. *Permeability and Capillarity of Soils. ASTM. STP 417*: 4-34.
- RICHARDS, B.G. (1978): Application of an experimentally based non-linear constitutive model of soils in laboratory and field tests. *Aust. Geomech. Jnl.* G8: 20-30.
- RICHARDS, B.G.(1984): Finite element analysis of volume change in expansive clays. *Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils*. Adelaida. pp 41-45.
- RICHARDS, B.G.; PETER, P. & MARTIN, R. (1984): The determination of volume change properties in expansive soils. *Proc. 5th Int. Conf. on Exp. Soils*. Adelaide. 179-186.
- RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B.(1993): A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Géotechnique* 43(2): 321-324.
- RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B.(1995): Measurement of suction in materials with swell. *Applied Mechanics Reviews* 48(9).
- RIVAS, P; VILLAR, M.V.; CAMPOS, R.; PELAYO, M.; MARTIN, P.L.; GOMEZ, P.; TURRERO, M.J.; HERNANDEZ, A.I.; COZAR, J.S. & MINGARRO, E.(1991): Caracterización de materiales de relleno y sellado para almacenamiento de residuos radiactivos: bentonitas españolas. *Informe CIEMAT-DT-TG*. Madrid. 196 pp.
- ROLFE, P.F. & AYLMORE, L.A.G.(1977): Water and salt flow through compacted clays: I. Permeability of compacted illite and montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 489-495.


- ROMERO, E.(1999): Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom-clay: An experimental study. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 405 pp.
- ROMERO, E.; GENS, A. & LLORET, A.(1999): Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom Clay. *Engineering Geology* 54: 117-127.
- ROSS, C.S. & HENDRICKS, S.B.(1945): Minerals of the montmorillonite group – Their origin and relation to soils and clays. *US Geological Survey Professional Paper* 205-B, 79 pp.
- SAIX, C. & JOUANNA, P.(1990): Appareil triaxial pour l'étude du comportement thermique de sols non saturés. *Can. Geotech. J.* 27: 119-128.
- SALO, J.-P. & KUKKOLA, T.(1989): Bentonite pellets, an alternative buffer material for spent fuel canister deposition holes. *Workshop "Sealing of Radioactive Waste Repositories"*. Braunschweig.
- SCHAAP, M.G.(1999): Rosetta help file: Predicting soil hydraulic parameters from basic soil data. <http://www.ussl.ars.usda.gov/MODELS/rosetta>.
- SELVADURAI, A.P.S.(1997): Hydro-thermo-mechanics of engineered clay barriers and geological barriers (Foreword). *Eng. Geol.* 47: 311-312.
- SING, K.S.W.; EVERETT, D.H.; HAUL, R.A.W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, R.A.; ROUQUÉROL, J. & SIEMIENIEWSKA, T.(1985): Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure & Appl. Chem.* 57(4): 603-619. IUPAC.
- SPOSITO, G. & PROST, R.(1982): Structure of water adsorbed on smectites. *Chem. Rev.* 82:554-573.
- STEPKOWSKA, E.T.(1990): Aspects of the clay/electrolyte/water system with special reference to the geotechnical properties of clays. *Eng. Geol.* 28(3-4): 249-268.
- STUDDS, P.G.; STEWART, D.I. & COUSENS, T.W.(1998): The effects of salt solutions on the properties of bentonite–sand mixtures. *Clay Minerals* 33: 651-660.
- TESSIER, D.; LAJUDIE, A. PETIT, J.-C.(1992): Relation between the macroscopic behaviour of clays and their microstructural properties. *Appl. Geochem.* 1: 151-161.
- THOMÉ, F.(1993): Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada. *Tesis Doctoral*. Cuadernos de investigación C36. CEDEX. Madrid. 241 pp.
- TINDALL, J.A. & KUNKEL, J.R.(1999): Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers. *Prentice Hall*. Upper Saddle River. 624 pp.
- TISOT, J.P. & ABOUSHOOK, M.(1983): Triaxial study of swelling characteristics. *Proc. 7th Asian Conf. Soil Mech. Found. Eng.* 1: 94-97. Manila.
- TSIGE, M.(1999): Microfábrica y mineralogía de las arcilla azules del Guadalquivir: influencia en su comportamiento geotécnico. *Tesis Doctoral*. Monografías M66. CEDEX. Madrid. 294 pp.

- TUNCER, E.R.(1988): Pore size distribution characteristics of tropical soils in relation to engineering properties. *2nd Inst. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils* 1: 63-70. Singapore.
- UPC (1998): FEBEX. Preoperational thermo-hydro-mechanical (THM) modelling of the "in situ" test. *Publicación técnica ENRESA* 09/98. Madrid. 99 pp.
- VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G. & PUFAHL, D.E.(1999): The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Géotechnique* 49(2): 143-159.
- VAN GENUCHTEN, M. TH.(1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
- VAN GENUCHTEN, M. Th.; LEIJ, F.J. & YATES, S.R.(1991): The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. U.S. Salinity Laboratory IAG-DW12933934. U.S. Environmental Protection Agency EPA/600/2-91/065. Riverside.
- VICOL, T.(1990): Comportement hydraulique et mécanique d'un limon non saturé. Application à la modélisation. *Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale de Ponts et Chaussées*. Paris. 257 pp.
- VILLAR, M.V.(1995a): Thermo-Hydro-Mechanical characterization of the Spanish reference clay material for engineered barrier for granite and clay HLW repository: Laboratory and small mock-up testing. *Publicación Técnica ENRESA* 03/95.
- VILLAR, M.V.(1995b): First results of suction controlled oedometer tests in highly expansive montmorillonite. In: E.E. ALONSO & P. DELAGE(eds): Unsaturated soils. *Proc. 1st Int. Conf. Unsaturated Soils* (Paris). Balkema. Rotterdam. pp 207-213.
- VILLAR, M.V.(1997): Muestreo y caracterización de bloques para el ensayo maqueta del Proyecto FEBEX. *Informe CIEMAT/IMA/54A15/7/97*. Madrid.
- VILLAR, M.V. & DARDAINE, M.(1990): Contribución a la selección de una arcilla española como material de relleno de un almacenamiento de combustible irradiado en roca dura. Resultados de la Fase I. Contrato CEA/ENRESA A2845. *Rapport Technique DRDS* nº 244 marzo 1990. CEA.
- VILLAR, M.V. & MARTIN, P.L.(1996): Suction controlled oedometer tests in montmorillonite clay. Preliminary results. In: S.P. Bentley(ed): Engineering geology of waste disposal. *Geological Society Engineering Geology Special Publication* No. 11. The Geological Society. London. pp 309-311.
- VILLAR, M.V. & MARTÍN, P.L.(1999): Efectos sobre el suelo y acuíferos del vertido de las minas de Aznalcóllar: Caracterización física de las muestras de suelo. Version 0. *Informe Técnico CIEMAT/DIAE/54012/3/99*. Madrid. 27 pp.
- VILLAR, M.V. & RIVAS, P.(1994): Hydraulic properities of montmorillonite-quartz and saponite-quartz clay mixtures. *Applied Clay Science* 9: 1-9.
- VILLAR, M.V.; FERNÁNDEZ, A.M. & CUEVAS, J.(1997): Caracterización geoquímica de bentonita compactada: Efectos producidos por flujo termohidráulico. Versión 1. *Informe CIEMAT/IMA/54A15/6/97. Informe FEBEX* 70-IMA-M-0-2. Madrid.

- VOLCKAERT, G.; BERNIER, F.; ALONSO, E.; GENS, A.; SAMPER, J.; VILLAR, M.V.; MARTÍN, P.L.; CUEVAS, J.; CAMPOS, R.; THOMAS, H.R.; IMBERT, C. & ZINGARELLI, V.(1996): Thermal-hydraulic-mechanical and geochemical behaviour of the clay barrier in radioactive waste repositories (model development and validation). *Nuclear science and technology*. EUR 16744. Commission of the European Communities. Luxembourg. 722 pp.
- VOLCKAERT, G.; ORTIZ, L.; DE CANNIÈRE, P.; PUT, M.; HORSEMAN, S.T.; HARRINGTON, J.F.; FIORAVANTE, V. & IMPEY, D.(1995): MEGAS – Modelling and experiments on gas migration in repository host rocks. Final Report Phase I. EUR 16235.
- WAN, A.W.L.; GRAY, M.N. & GRAHAM, J.(1995): On the relations of suction, moisture content, and soil structure in compacted clays. In: E.E. ALONSO & P. DELAGE(eds): Unsaturated soils. Proc. 1st Int. Conf. Unsaturated Soils (Paris). *Balkema*. Rotterdam. pp 215-222.
- WHEELER, S.J.(1986): The stress-strain behaviour of soils containing gas bubbles. *PhD. Thesis*. University of London.
- WHEELER, S.J.(1988): The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles. *Géotechnique* 38(3): 399-413.
- WHITE, G.N. & DIXON, J.B.(1997): Mineralogical, Physical and Chemical Properties of a Bentonite from Minas de Gádor, Spain. Informe. Clay Mineralogy Laboratory. Soil and Crop Science Departement. *Texas A&M University*. Texas. 18 pp.
- WILKINSON, W.B. & SHIPLEY, E.L.(1972): Vertical and horizontal laboratory permeability measurements in clay soils. In: IAHR(Ed.): Fundamentals of transport phenomena in porous media. *Developments in Soil Science* 2. Elsevier. pp 285-297.
- WIND, G.P.(1966): Capillary conductivity data estimated by a simple method. *Proc. UNESCO/IASH Symp. Water in the Unsturated Zone*. Wageningen. pp 181-191.
- WONG, H.Y. & YONG, R.N.(1975): Unsaturated flow mechanics in low swelling clays. *Soil Science* 120(5): 339-348.
- WOODBURN, J.A.; HOLDEN, J. & PETER, P.(1993): The transistor psychrometer: a new instrument for measuring soil suction. In: HOUSTO & WRAY (eds.): Unsaturated Soils. *Geotechnical Special Publications ASCE* n°39. Dallas. 91-102.
- WOODING, R.A.(1968): Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.* 4: 1259-1273.
- YONG, R.N.; BOONSINSUK, P. & WONG, G.(1986): Formulation of backfill material for a nuclear fuel waste disposal vault. *Can. Geotech. J.* 23: 216-228.
- YONG, R.N.; MOHAMED, A.M.O. & WARKENTIN, B.P.(1992): Principles of contaminant transport in soils. *Developments in Geotechnical Engineering* 73. Elsevier. Amsterdam. 327 pp.
- YOSHIMI, Y. & OSTERBERG, J.O.(1963): Compression of partially saturated cohesive soils. *J. Soil Mechanics and Foundations Division*. ASCE 89, SM 4: 1-24.

ANEXO I

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

	DEPARTAMENTO DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA ENERGÍA	HOJA 1 DE 10
	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE EMPLAZAMIENTOS	REVISIÓN I
PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO:		

TITULO: PERMEABILIDAD DE MATERIALES EXPANSIVOS

COPIA CONTROLADA N°:

ASIGNADA A:

REDACTADO POR: (*)	María Victoria Villar Galicia
REVISADO POR: (*)	
CONFORMADO POR	
APROBADO POR: (*)	

(*) NOMBRE(S). FIRMA(S). FECHA(S)

[illegible]

INDICE

1	OBJETO	4
2	ALCANCE	4
3	DEFINICIONES.....	4
4	DESCRIPCIÓN	5
4.1	Instrumentación y materiales.....	5
4.2	Condiciones de operación.....	7
4.3	Calibrado	7
4.4	Metodología.....	7
4.4.1	Pasos previos	7
4.4.2	Preparación de la muestra.....	7
4.4.3	Montaje.....	8
4.4.4	Desarrollo del ensayo	8
4.4.5	Desmontaje	8
4.5	Observaciones finales	9
4.6	Cálculo de resultados.....	9
4.7	Almacenamiento de muestras	10
4.8	Registro de resultados.....	10
4.9	Fecha de revisión	10
5	RESPONSABLES	10
6	REFERENCIAS	10
7	ANEXOS	10

Ciemat	PERMEABILIDAD DE MATERIALES EXPANSIVOS	HOJA 4 DE 10
		REVISIÓN 0

1 OBJETO

Establecer un procedimiento para determinar la conductividad hidráulica, a través del coeficiente de permeabilidad saturada (k_w), en materiales arcillosos expansivos de baja permeabilidad con los que no se puede trabajar en un perméametro de carga constante dentro de una celda triaxial convencional, debido a su alto potencial de hinchamiento al saturar y a los elevados gradientes hidráulicos necesarios para hacer circular el agua dentro de la probeta.

2 ALCANCE

El presente procedimiento afecta al personal del Proyecto de Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos que precise realizar el ensayo de “Permeabilidad de materiales expansivos” en la Instalación 542 “Laboratorio de Mecánica de Suelos”. El método es aplicable a suelos expansivos inalterados o remoldeados y se pueden emplear diferentes tipos de agua. El rango de permeabilidades en que se trabaja habitualmente está entre 10^{-10} y 10^{-16} m/s.

3 DEFINICIONES

La determinación de la permeabilidad saturada al agua, o conductividad hidráulica, consiste en la medida en función del tiempo del volumen de agua que atraviesa una probeta de material confinada lateralmente y a la que se impone un gradiente hidráulico entre la parte superior y la inferior. El método consiste en aplicar una carga hidráulica (ΔP), es decir, una diferencia de potencial, entre la parte superior e inferior de una muestra de dimensiones fijas y conocidas (superficie: A , altura: l) previamente saturada. Al mismo tiempo, se mide el flujo de agua que atraviesa la probeta en función del tiempo ($\Delta V/\Delta t$). Con estos parámetros se calcula la permeabilidad k_w aplicando la ley de Darcy sobre flujo en medios porosos, lo que supone considerar sólo el movimiento macroscópico del agua, que el flujo es laminar y que el sólido poroso es macroscópicamente isótropo (Jiménez & Justo 1971):

$$k_w = \frac{\Delta V \times l}{A \times \Delta t \times \Delta P}$$

La novedad del método respecto a la medida convencional de k_w en perméametro de carga fija con célula triaxial, consiste en la posibilidad de utilizarlo en materiales expansivos que modificarían su volumen al saturar y a los que es necesario aplicar elevados gradientes, además de la sencillez con que pueden utilizarse diferentes tipos de agua.

4 DESCRIPCIÓN

4.1 Instrumentación y materiales

El sistema de medida está constituido de los siguientes elementos (Figura 1):

- Celda de acero inoxidable, con entrada y salida de agua, en la que se confina la muestra. Las dimensiones de la probeta son 19,63 cm² de superficie y 2,50 cm de altura, lo que supone un volumen de 49,10 cm³.
- Dos sistemas de presión: depósitos de mercurio, mantenedor de carga o bomba automática.
- Aparato electrónico de medida de cambio de volumen con precisión de 0,001 cm³.
- Sistema de adquisición de datos.

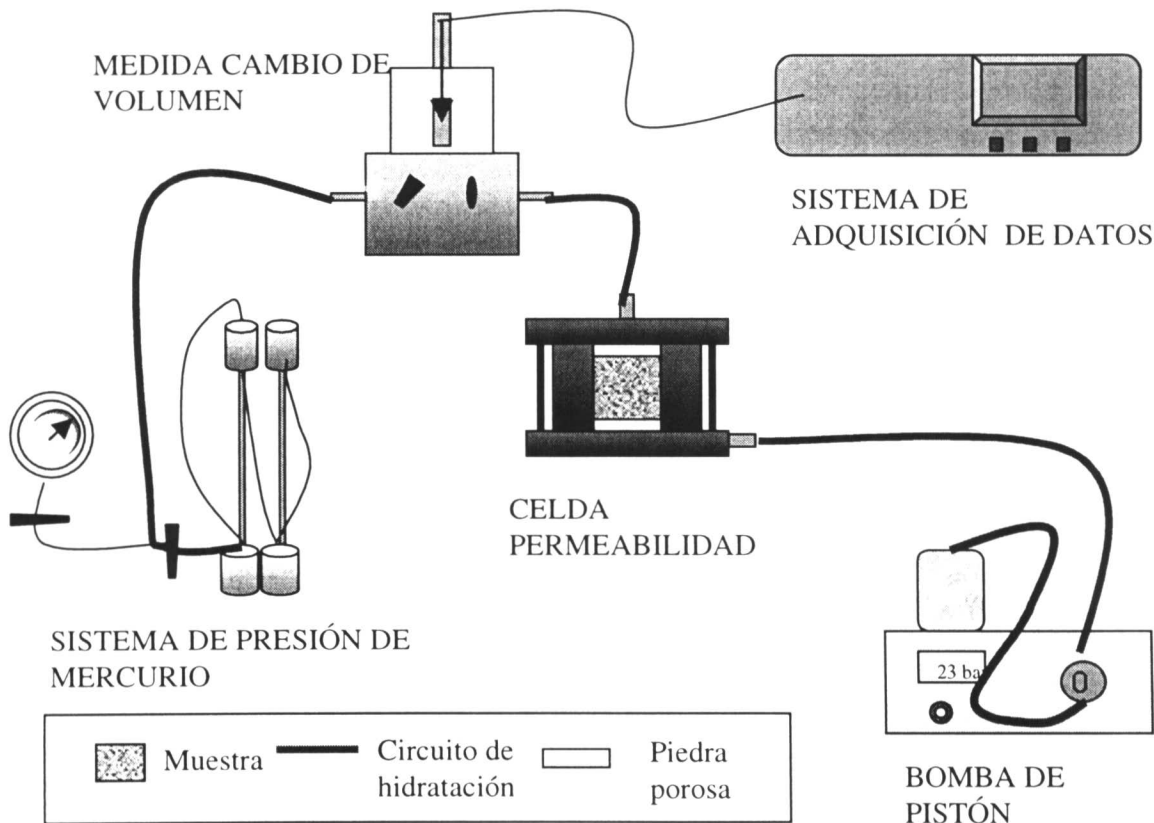


Figura 1: Representación esquemática del dispositivo para medida de permeabilidad en materiales expansivos

Otros equipos y materiales necesarios son:

Ciemat	PERMEABILIDAD DE MATERIALES EXPANSIVOS	HOJA 6 DE 10
		REVISIÓN 0

- Molde de compactación para fabricar pastillas remoldeadas en el interior del anillo de la celda, fabricado en acero indeformable (Figura 2).
- Prensa uniaxial para compactación, con capacidad hasta 50 t o gato hidráulico.
- Discos de papel de filtro Whatman 54 y piedras porosas del diámetro de la muestra.
- Agua destilada u otra de composición definida.
- Depósitos intercambiadores, es decir, que permiten permitan aplicar presión a través de ellos a la vez que separan dos fluidos de diferentes características en su interior (por ejemplo, aguas de diferente composición).
- Balanza, de capacidad superior a 500 g y de resolución $\pm 0,01$ g, y recipientes para pesado.
- Estufa regulable a 110°C y recipientes para secado en estufa.
- Herramientas: llaves Allen y fijas para los moldes de compactación, martillo con tacos de teflón para desmontar la muestra.
- Anillo cortador del diámetro del anillo de la celda para preparación de muestras inalteradas.

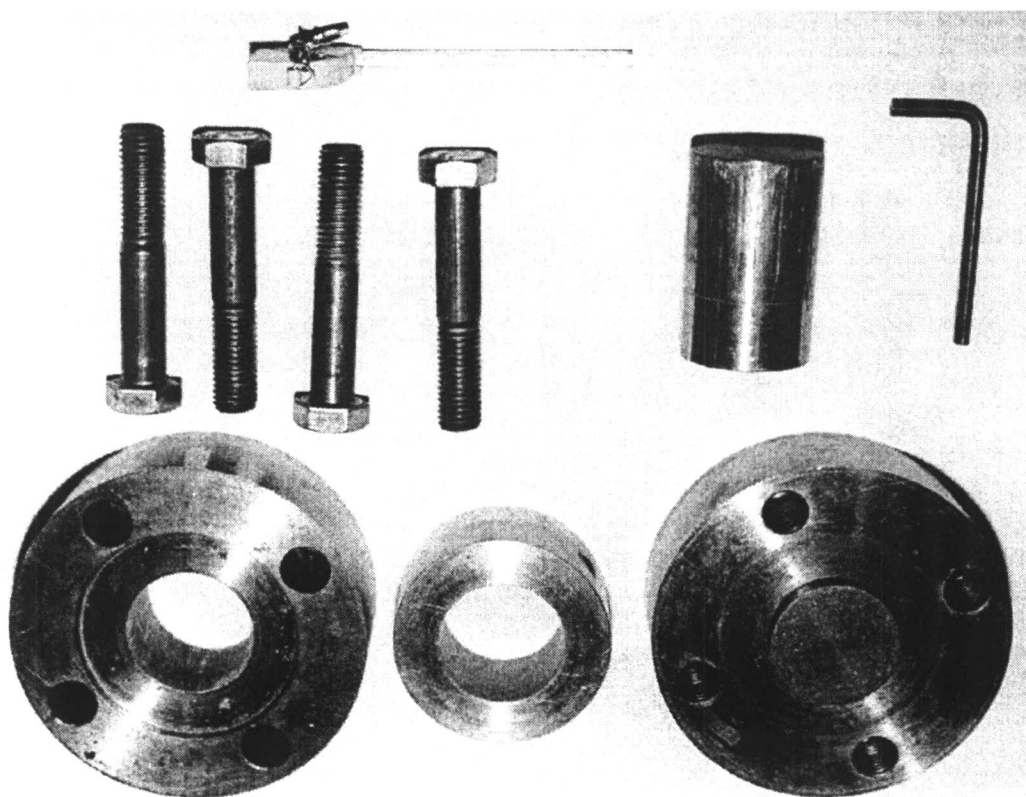



Figura 2: Molde de compactación para ensayos de permeabilidad

	PERMEABILIDAD DE MATERIALES EXPANSIVOS	HOJA 7 DE 10
		REVISIÓN 0

4.2 Condiciones de operación

El ensayo de conductividad hidráulica debe realizarse a temperatura constante, preferiblemente entre 20 y 25°C, ya que ésta influye en la medida. Este dato deberá consignarse en el resultado.

4.3 Calibrado

Se realizará un calibrado periódico de estufa y balanza.

Debe tararse periódicamente (máximo cada 6 meses) el equipo de medida de cambio de volumen, introduciendo los datos de la calibración en el sistema de adquisición de datos.

4.4 Metodología

4.4.1 Pasos previos

Las piedras porosas deben estar limpias y secas.

Todos los datos del ensayo se anotarán en el impreso correspondiente: referencia del ensayo; material utilizado; densidad, humedad y dimensiones de la muestra; fechas de fabricación, de inicio de saturación, de medida y de desmontaje; presión de saturación y de medida; así como la identificación de cada uno de los equipos utilizados y del operador.

4.4.2 Preparación de la muestra

En el caso de muestras inalteradas será necesario adecuarlas al diámetro del anillo de la celda tallándolas con el anillo cortador correspondiente, procurando no modificar ni su humedad ni su densidad.

Para muestras remoldeadas se prepara una pastilla de la densidad y humedad requeridas, compactándola directamente en el interior del anillo de la celda:

- Se calcula el peso de muestra (Pm) necesario para fabricar la pastilla con la densidad y humedad deseadas, teniendo en cuenta el volumen del molde de compactación (49,10 cm³).
- Se toma una muestra representativa y se pesa la cantidad necesaria.
- Se introduce en el molde, en el que previamente se habrá acoplado el anillo de la celda, con ayuda de un embudo si es necesario y se compacta en la prensa uniaxial o con un gato hidráulico.

Ciemat	PERMEABILIDAD DE MATERIALES EXPANSIVOS	HOJA 8 DE 10
		REVISIÓN 0

4.4.3 Montaje

A ambos lados de la muestra contenida en el anillo se coloca un disco de papel de filtro y una piedra porosa del diámetro de la muestra. El anillo así preparado se coloca en la celda, fijando la parte inferior y superior por medio de los tornillos correspondientes.

Las tomas de agua superior e inferior de la celda se conectan a un sistema de presión (normalmente los depósitos de mercurio) constante a 6 bar. De esta manera se hidrata la muestra hasta saturación completa durante el tiempo necesario, que depende del tipo de muestra y de su densidad y humedad inicial, y que suele fijarse en un mínimo de 2 semanas. Este proceso tiene el fin de garantizar un contacto perfecto con las paredes de la celda una vez que se produce el hinchamiento. Si se requiere un tipo de agua determinado, será necesario utilizar un depósito intercambiador intermedio entre la celda y el sistema de presión.

4.4.4 Desarrollo del ensayo

Una vez saturada la muestra se aplica un gradiente hidráulico, mediante el incremento de la presión de inyección en la parte inferior de la celda (P_i), mientras se mantiene una presión en cola de 6 bar (P_c), para favorecer la disipación de burbujas de aire en el sistema. Para incrementar la presión lo suficiente como para producir un flujo de agua apreciable en materiales expansivos, es necesario recurrir a sistemas de presión como bombas de pistón, que permiten aplicar un amplio rango de presiones (hasta 420 bar). De esta manera se obtiene una carga hidráulica, que corresponde a la diferencia entre la presión de inyección inferior y la superior en cola ($\Delta P = P_i - P_c$). El gradiente hidráulico, supuesto lineal, es la relación entre la carga hidráulica y la longitud de la probeta. La toma superior de la celda se conecta a un aparato de medida de cambio de volumen, y éste a su vez a un sistema de adquisición de datos, que registra periódicamente el volumen de agua que atraviesa la muestra. Para ello es necesario configurar el ensayo en el ordenador de control, especificando la referencia del ensayo y los canales y tiempo de registro de datos. El nombre del fichero de datos se especifica en el impreso del ensayo. El ensayo se ha de prolongar el tiempo suficiente para permitir comprobar que el volumen de agua que atraviesa la probeta tiene una relación lineal y estable con el tiempo, lo que suele suponer de 4 a 7 días. Si no se observa flujo de agua será necesario incrementar la carga hidráulica mediante el aumento de la presión de inyección, pero siempre manteniendo ésta por debajo de la presión de hinchamiento, para no alterar la microestructura del material.

4.4.5 Desmontaje

- Parar los sistemas de presión y desconectar las tomas de agua.
- Desmontar la celda en un lugar próximo a la balanza, extraer la pastilla, si es necesario con ayuda del gato hidráulico, y pesarla procurando que en el proceso no se pierda material, anotando el valor en el impreso (P_f). Medirla y anotar sus dimensiones.
- Secar la pastilla en estufa a 110°C durante 24 horas (*cf.* Norma UNE 103-300-93) y anotar el peso seco (P_s).

Ciemat	PERMEABILIDAD DE MATERIALES EXPANSIVOS	HOJA 9 DE 10
		REVISIÓN 0

Todos los datos han de anotarse en el impreso correspondiente (cf. Anexos).

4.5 Observaciones finales

Pesar la muestra a las 24 horas y anotar el dato en el impreso correspondiente.

El fichero de datos se graba para su tratamiento posterior.

La celda se guardará limpia y seca.

Las piedras porosas se meten en agua durante unas horas para que se limpien de partículas arcillosas. Periódicamente se limpiarán en el baño de ultrasonidos, para lo que se introducen en un vaso de precipitados con agua destilada jabonosa dentro del baño y se ultrasonan de 2 a 5 minutos. Se cambia el agua destilada del vaso de precipitados y se repite el proceso. Una vez secas al aire se guardan en desecador con gel de sílice.

4.6 Cálculo de resultados

Con ayuda de los datos del fichero del ensayo se realizan las siguientes determinaciones y cálculos que se reflejan en el impreso del ensayo:

1. Se representan los valores de volumen de agua que atraviesa la muestra en función del tiempo y se determina el tramo de la curva en el que esta relación tiene una pendiente constante, que estará comprendido entre los tiempos t_1 y t_2 .
2. Se determinan los valores de volumen de agua correspondientes a los tiempos t_1 y t_2 : V_1 y V_2 .
3. Se calcula el coeficiente de permeabilidad, aplicando la fórmula:

$$k_w = \frac{\Delta V \times l}{A \times \Delta t \times \Delta P} = \frac{(V_2 - V_1) \times l}{A \times (t_2 - t_1) \times (P_i - P_c)}$$

donde P_i y P_c son la presión de inyección en la parte inferior y superior de la probeta, respectivamente, A es la superficie de la celda ($19,63\text{ cm}^2$) y l la altura de la probeta ($2,50\text{ cm}$). El error relativo de esta medida es inferior al 10%.

4. Se determinan las humedades inicial y final de la muestra a partir de los pesos inicial (P_m), final (P_f) y seco (P_s) según la Norma UNE 103-300-93. A partir del peso seco se comprueba también la densidad de la probeta, dividiendo este valor por el volumen de la celda ($49,10\text{ cm}^3$).

Ciemat	PERMEABILIDAD DE MATERIALES EXPANSIVOS	HOJA 10 DE 10
		REVISIÓN 0

4.7 Almacenamiento de muestras

Una vez determinada la humedad las muestras se desechan.

4.8 Registro de resultados

Los resultados intermedios y finales, así como cualquier otro tipo de anotación de interés, deben ser registrados en los impresos y hojas de cálculo correspondientes (cf. impreso adjunto).

4.9 Fecha de revisión

Este procedimiento se revisará en tres años a partir de la fecha de su aprobación.

5 RESPONSABLES

Los responsables del cumplimiento de este procedimiento y de la realización práctica de las tareas descritas en el mismo serán:

El Jefe de Laboratorio, Técnico Superior Licenciado en Ciencias. Responsable del cumplimiento global del procedimiento y de la elaboración de resultados.

El Analista Instrumentista, nivel de formación FPPII rama laboratorio o equivalente. Responsable de la realización del proceso.

6 REFERENCIAS

JIMÉNEZ, J.A. & JUSTO, J.L., de (1971): Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas. *Ed. Rueda*. pp. 137-145.

Norma UNE 103-300-93: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

7 ANEXOS

Formato: Permeabilidad con aparato de cambio de volumen.

PERMEABILIDAD CON APARATO DE CAMBIO DE VOLUMEN
(Procedimiento IMA/X8/BI-F14)

Referencia	
------------	--

FABRICACIÓN PROBETA

Muestra		Peso específico	
Volumen molde	cm ³	Sección (A)	cm ²
Densidad	g/cm ³	Humedad	%
Balanza	09218	Calibre	24481
Peso seco teórico	g	Muestra pesada	g
Peso probeta	g	Altura probeta (h)	cm
Sist./carga comp.	kg	Fecha fabricación	

DATOS ENSAYO

Inicio saturación		Tipo agua		P saturación	bar
Pasada		1		2	3
Nombre fichero					
Sensor/puesto/canal					
Fecha inicio					
P confinamiento /sistema		bar		bar	bar
P en cola (Pc) / sistema		cm		cm	cm
P inyección (Pi) / sistema		cm		cm	cm
Fecha fin					
tiempo t ₁		s		s	s
volumen agua V ₁		cm ³		cm ³	cm ³
tiempo t ₂		s		s	s
volumen agua V ₂		cm ³		cm ³	cm ³
Δt (t ₂ - t ₁)		s		s	s
ΔV (V ₂ -V ₁)		cm ³		cm ³	cm ³
ΔP (Pi-Pc)		cm		cm	cm
k = (ΔVxh)/(ΔtxΔPxA)		cm/s		cm/s	cm/s


DESMONTAJE Fecha

Balanza/calibre	09218/24481	Estufa	23410
Altura probeta	cm	Diámetro	cm
Peso final	g	Peso seco	g

Volumen inicial	cm ³	Volumen final	cm ³
Humedad inicial	%	Humedad final	%
Densidad inicial	g/cm ³	Densidad final	g/cm ³
S _r inicial	%	S _r final	%

ANEXO II

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE HINCHAMIENTO EN EDÓMETRO

	DEPARTAMENTO DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA ENERGÍA	HOJA 1 DE 12
	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE EMPLAZAMIENTOS	REVISIÓN 1
PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO:		

TITULO: PRESIÓN DE HINCHAMIENTO EN EDÓMETRO

COPIA CONTROLADA N°:

ASIGNADA A:

REDACTADO POR: (*) María Victoria Villar Galicia

REVISADO POR: (*)

CONFORMADO POR

APROBADO POR: (*)

INDICE

1	OBJETO	4
2	ALCANCE	4
3	DEFINICIONES.....	4
4	DESCRIPCIÓN.....	4
4.1	Instrumentación y materiales.....	4
4.2	Condiciones de operación.....	7
4.3	Calibrado	7
4.4	Metodología.....	8
4.4.1	Pasos previos	8
4.4.2	Preparación de la muestra.....	8
4.4.3	Montaje	9
4.4.4	Desarrollo del ensayo	9
4.4.5	Desmontaje	9
4.5	Observaciones finales	10
4.6	Cálculo de resultados.....	10
4.7	Almacenamiento de muestras	11
4.8	Registro de resultados.....	11
4.9	Fecha de revisión	11
5	RESPONSABLES	11
6	REFERENCIAS	12
7	ANEXOS	12

Ciemat	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO EN EDÓMETRO	HOJA 4 DE 12
		REVISIÓN 0

1 OBJETO

Establecer un procedimiento para determinar la presión de hinchamiento en equilibrio ejercida por una muestra al saturarse completamente a volumen constante.

2 ALCANCE

El presente procedimiento afecta al personal del Proyecto de Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos que precise realizar el ensayo de “Presión de hinchamiento en edómetro” en la Instalación 542 “Laboratorio de Mecánica de Suelos”. El método es aplicable a suelos inalterados o remoldeados.

3 DEFINICIONES

Los materiales arcillosos se caracterizan por su gran deformabilidad al hidratarse, ya que las partículas incorporan el agua en su estructura aumentando la distancia entre interláminas. Si el material se satura a volumen constante y su deformación es impedida, las partículas ejercerán una presión sobre la estructura confinante que se denomina presión de hinchamiento.

En el caso de edómetros convencionales, la muestra se introduce en un anillo portamuestras que impide su deformación lateral, y se satura por las superficies inferior y superior a través de placas porosas. El pistón superior, solidario con la piedra porosa, está conectado a un vástago de carga cuyo desplazamiento, o bien el del mismo pistón, se puede medir con exactitud por medio de un comparador. Para mantener el volumen de la muestra constante, se aplica a ésta carga mediante un brazo de palanca, de manera que no se registre ningún desplazamiento en el comparador. Aplicando a esta carga el factor del brazo de palanca y dividiéndola por la superficie de la pastilla, se tiene la presión de hinchamiento de la muestra para la densidad a la que se realizó el ensayo.

4 DESCRIPCIÓN

4.1 Instrumentación y materiales

- Bancada edométrica, con brazo de palanca de entre 1:7 y 1:10, equipada con celda edométrica (Figura 1) con sus piedras porosas superior e inferior, anillos portamuestras capaces de albergar

muestras de diferentes diámetros y sus correspondientes bridas y comparador que aprecie centésima o milésima de centímetro.

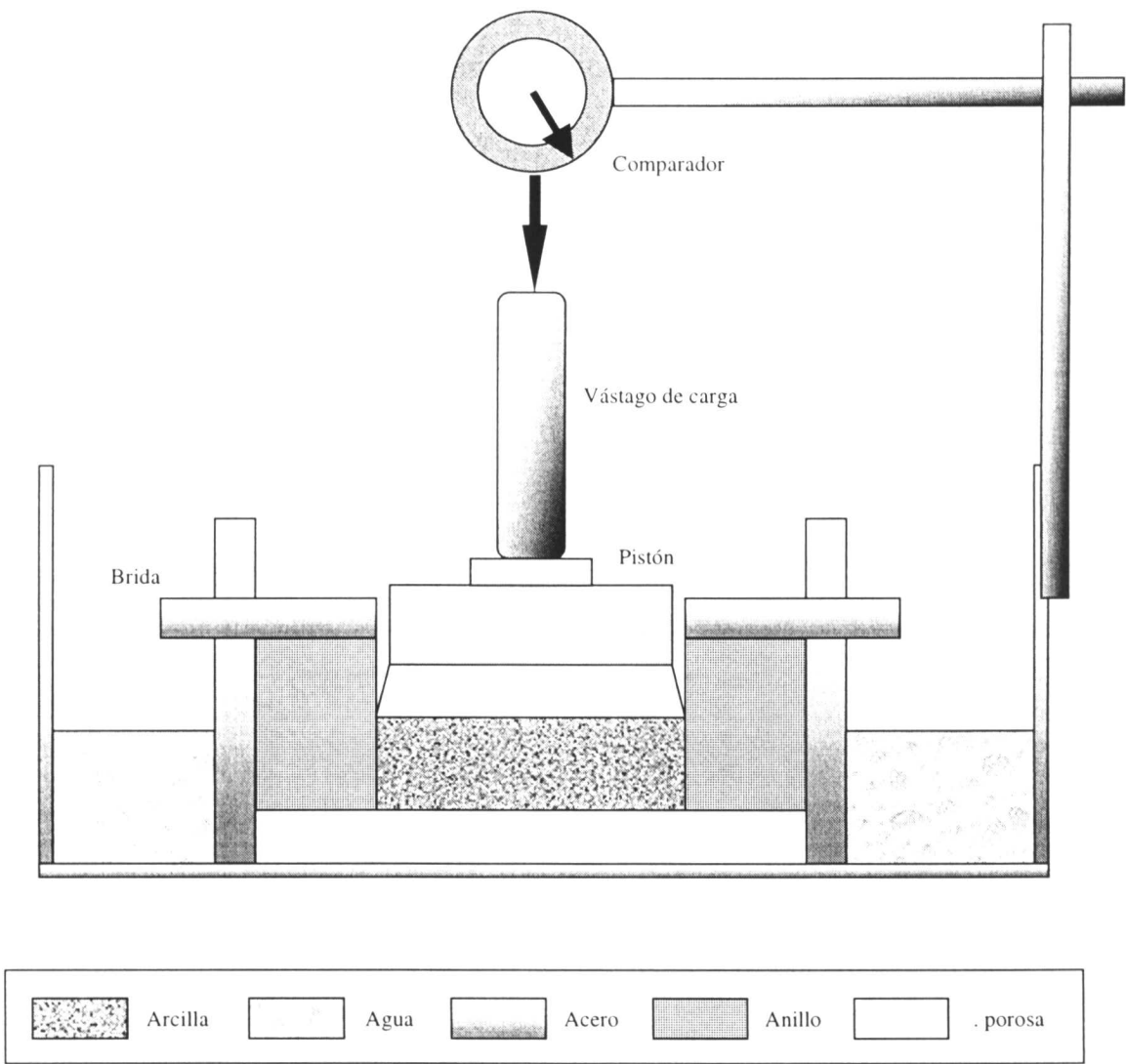


Figura 1: Sección esquemática de la celda edométrica

- Molde de compactación para fabricar pastillas remoldeadas en el interior de los anillos del edómetro, fabricado en acero indeformable (Figura 2 y Figura 3).
- Prensa uniaxial para compactación, con capacidad hasta 50 t o gato hidráulico.
- Discos de papel de filtro Whatman 54, del diámetro de la muestra.
- Agua destilada.
- Balanza, de capacidad superior a 500 g y que aprecie $\pm 0,01$ g, y recipientes para pesado.

- Estufa regulable a 110 °C y recipientes para secado en estufa.
- Herramientas: llaves Allen para los moldes de compactación y fijas para la celda del edómetro.
- Anillos cortadores del diámetro de los anillos del edómetro para preparar muestras inalteradas.

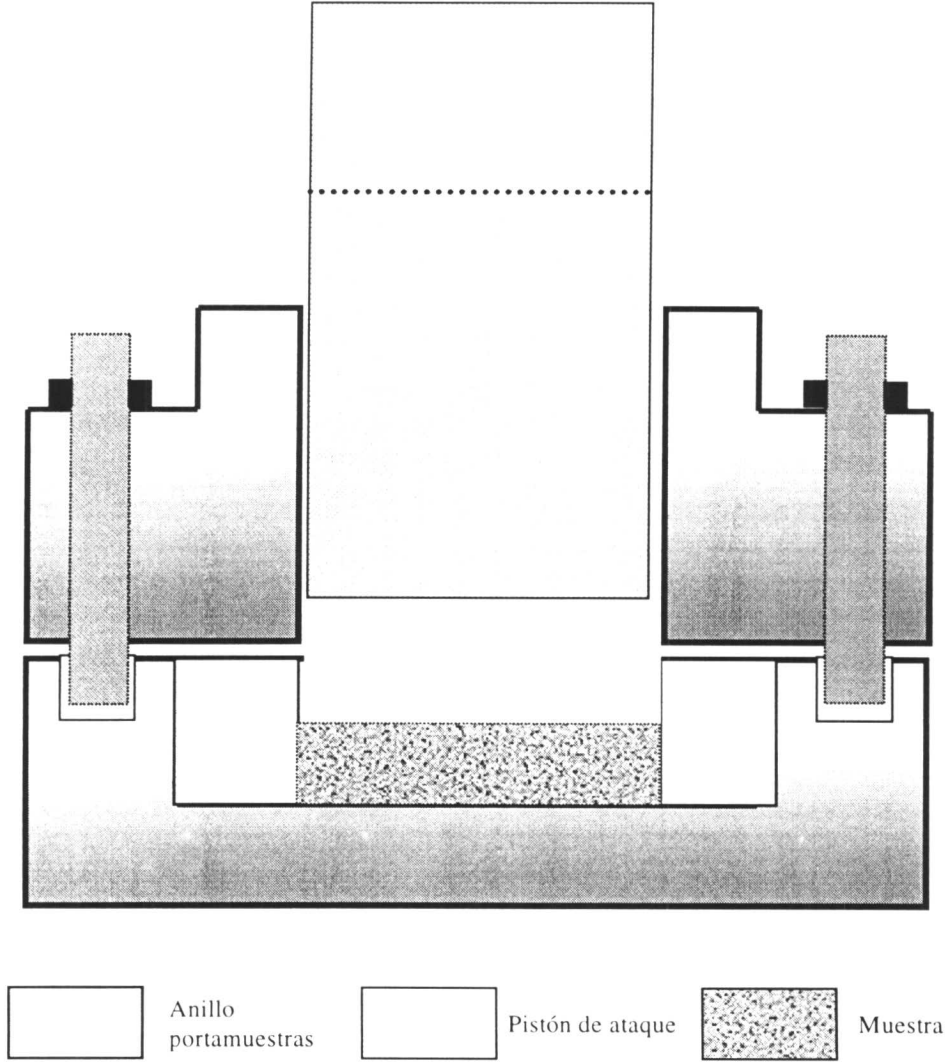


Figura 2: Sección esquemática del molde de compactación

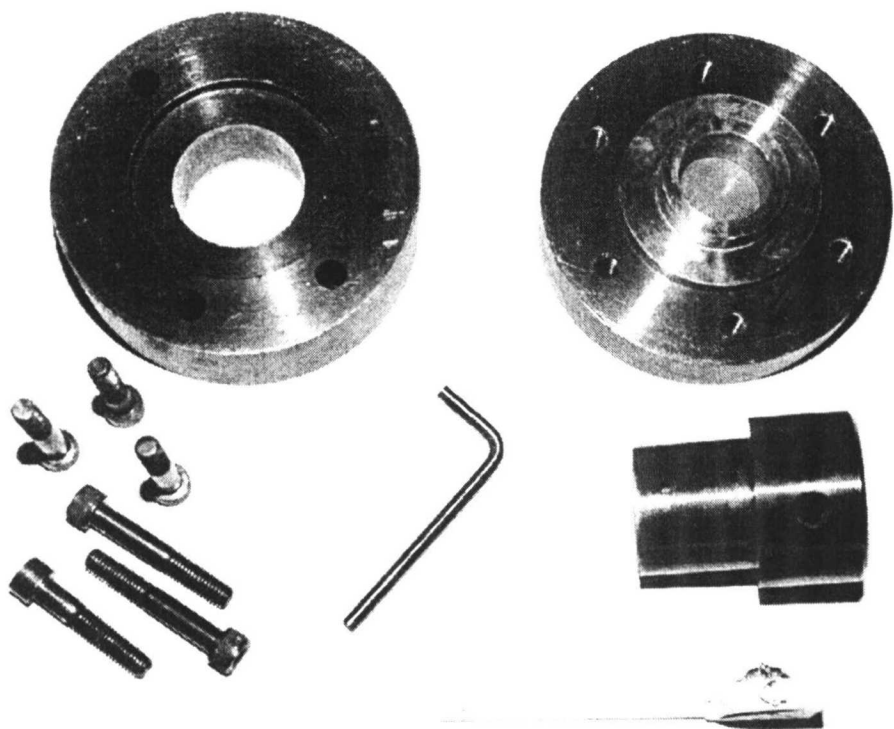


Figura 3: Molde de compactación


4.2 Condiciones de operación

El ensayo de presión de hinchamiento debe realizarse a temperatura constante, preferiblemente entre 20 y 25 °C, ya que ésta influye en la medida. Este dato deberá indicarse en el resultado.

4.3 Calibrado

Se realizará un calibrado periódico de estufa y balanza, así como del brazo de palanca de los edómetros. Para esto último se utilizará un anillo dinamométrico o célula de carga que permita determinar con precisión la presión aplicada en función de las pesas colocadas en el colgadero.

El equipo edométrico puede sufrir cierta deformación instantánea al aplicarse la carga y al descargar. Esta deformación debe medirse cuidadosamente para poder discernir en cada momento qué parte de la deformación medida corresponde efectivamente a la muestra y cuál ha de sustraerse por corresponder al aparato. La forma de hacerlo es calibrar el equipo utilizando una pastilla, de la misma altura que la muestra con que se trabaja habitualmente y de diámetro 1 mm menor, no deformable bajo las cargas aplicadas, de acero, que se coloca en el lugar de la muestra. El tarado ha de hacerse también incluyendo el papel de filtro y saturándolo con agua destilada, tal y como se hace en el ensayo con muestra (ASTM D2435). A continuación se procede a la carga del equipo y

	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO EN EDÓMETRO	HOJA 8 DE 12
		REVISIÓN 0

se registra la deformación observada al estabilizarse. La deformación del equipo ha de sustraerse de la lectura registrada inmediatamente después de la aplicación de la carga.

Hay que señalar que el calibrado del equipo no es exactamente repetitivo, incluso aunque se lleve a cabo en las mismas condiciones, por lo que ha de realizarse varias veces con el fin de obtener valores medios.

4.4 Metodología

4.4.1 Pasos previos

Las piedras porosas deben estar limpias y secas.

La temperatura del recinto debe mantenerse constante.

El ensayo comenzará preferiblemente a primera hora de la mañana, para tener tiempo suficiente en el transcurso de la jornada de estabilizar el hinchamiento.

Todos los datos del ensayo se anotarán en el impreso correspondiente: referencia del edómetro, brazo de palanca, dimensiones de la muestra, fecha y hora de inicio, material utilizado, densidad y humedad de la muestra, tipo de agua, etc.

4.4.2 Preparación de la muestra

En el caso de muestras inalteradas será necesario adecuarlas al diámetro de los anillos del edómetro tallándolas con el anillo cortador correspondiente, procurando no modificar ni su humedad ni su densidad.

Para muestras remoldeadas se prepara una pastilla de la densidad y humedad requeridas, compactándola directamente en el interior del anillo del edómetro:

- Se calcula el peso de muestra necesario para fabricar la pastilla con la densidad y humedad deseadas, teniendo en cuenta el volumen del molde de compactación.
- Se toma una muestra representativa y se pesa la cantidad necesaria.
- Se introduce en el molde, en el que previamente se habrá acoplado el anillo del edómetro, con ayuda de un embudo si es necesario y se compacta en la prensa uniaxial o con un gato hidráulico.
- Se desmonta el molde de compactación y se pesan anillo y muestra, anotándolo en el impreso correspondiente.

4.4.3 Montaje

- Montaje de la celda: se coloca la placa porosa inferior en la celda y sobre ella un papel de filtro de las dimensiones de la muestra o mayor. Sobre éste se coloca el anillo portamuestras con la pastilla en su interior. Se fija el conjunto con la brida de la celda y se coloca el pistón.
- El conjunto se lleva al alojamiento del edómetro, se ajusta el vástago de carga, se nivela el brazo de palanca, y se coloca el comparador, ajustando la lectura a un valor intermedio de su recorrido (500 ó 5000, según el comparador).
- Se llena la celda de agua destilada y se espera a que la muestra comience a saturarse.

4.4.4 Desarrollo del ensayo

Se observa el desplazamiento registrado por el comparador a medida que la muestra se satura, y se va compensando éste por medio de la aplicación de cargas. Se ha de procurar que la lectura del comparador no se aleje mucho de la inicial, manteniéndola en un margen de $\pm 0,005$ cm, evitando de esta forma tanto el hinchamiento como la consolidación de la muestra. Las principales modificaciones en la carga aplicada y en la lectura del comparador se irán registrando en el impreso. Cuando no se observe ya deformación durante al menos 24 horas, el ensayo se considera finalizado, anotándose fecha, carga y lectura del comparador en el impreso.

4.4.5 Desmontaje

Una vez alcanzado el equilibrio, el ensayo se considera finalizado, anotándose fecha y lectura final del comparador en el impreso y procediendo a su desmontaje:

1. Vaciar el agua de la celda.
2. Quitar la carga.
3. Liberar la celda de su alojamiento y quitar el comparador.
4. Desmontar la celda en un lugar próximo a la balanza. Es necesario conocer con la mayor precisión posible tanto la altura como el peso final de la muestra. La altura puede variar fácilmente durante el proceso de desmontaje, sobre todo si ha habido una liberación grande de carga. Para evitar al máximo la discrepancia entre la altura real de la muestra al final del ensayo edométrico y la altura medida una vez extraída de la celda, en cuanto el conjunto formado por el anillo, la muestra y la piedra porosa se extrae de la celda, se mide la altura del pistón solidario a la piedra porosa superior que sobresale con respecto al anillo portamuestras (h_s). Conociendo la altura del pistón (h_p) y la altura del anillo portamuestras (h_a), se puede determinar con precisión la altura de la muestra antes de extraerla del anillo (Figura 4):

$$h_m = h_s + h_a - h_p$$

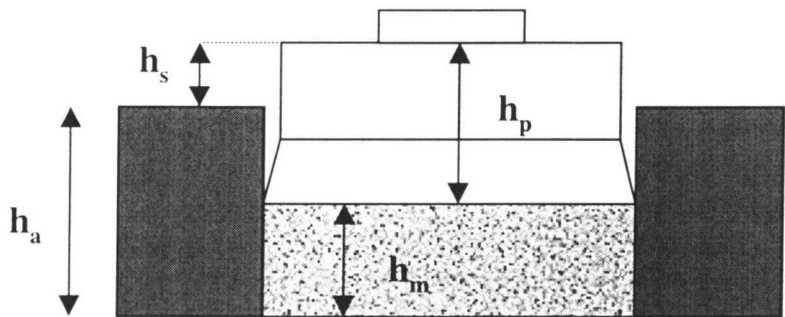


Figura 4: Medidas tomadas después de desmontar el anillo portamuestras del edómetro

- Con el fin de que el peso final medido coincida efectivamente con el peso de la muestra, se pesa inicialmente el conjunto formado por el anillo portamuestras, la muestra, el papel de filtro inferior y el pistón superior. Después se extrae la muestra del anillo y se pesan todos los componentes, limpios de restos de muestra, por separado. La diferencia entre el peso inicial del conjunto y la de todos los componentes da el peso final de la muestra (P_f). La muestra pesada y medida, o parte de ella, se seca en estufa a 110 °C para determinar su humedad final (w_f) (Norma UNE 103-300).

Todos los datos han de anotarse en el impreso correspondiente (cf. Anexos).

4.5 Observaciones finales

- Pesar la muestra a las 24 horas y anotar el dato en el impreso correspondiente.
- La celda del edómetro se guardará limpia y seca en su alojamiento.
- Las piedras porosas se meten en agua durante unas horas para que se limpien de partículas arcillosas. Periódicamente se limpiarán en el baño de ultrasonidos, para lo que se introducen en un vaso de precipitados con agua destilada jabonosa dentro del baño y se ultrasonan de 2 a 5 minutos. Se cambia el agua destilada del vaso de precipitados y se repite el proceso.

4.6 Cálculo de resultados

En el impreso correspondiente se determina:

- Presión de hinchamiento: multiplicando el peso total aplicado (pesas) por el brazo de palanca y dividiendo por la superficie de la muestra.

1. A partir del peso final de muestra (Pf) y de la humedad final determinada (wf) se calcula el peso seco (Ps).

$$Ps = \frac{Pf}{1 + \frac{wf}{100}}$$

2. A partir del peso seco determinado se comprueba la densidad y la humedad iniciales.
3. La densidad seca final (ρ_d) se calcula dividiendo el peso seco por el volumen final calculado a partir del diámetro (ϕ) y la altura (h) medidos.

$$\rho_d = \frac{P \text{ seco}}{\pi \times \left(\frac{\phi \text{ final}}{2}\right)^2 \times h \text{ final}}$$

4.7 Almacenamiento de muestras

Una vez determinada la humedad las muestras se desechan.

4.8 Registro de resultados

Los resultados intermedios y finales, así como cualquier otro tipo de anotación de interés, deben ser registrados en los impresos y hojas de cálculo correspondientes (cf. impreso adjunto).

4.9 Fecha de revisión


Este procedimiento se revisará en tres años a partir de la fecha de su aprobación.

5 RESPONSABLES

Los responsables del cumplimiento de este procedimiento y de la realización práctica de las tareas descritas en el mismo serán:

El Jefe de Laboratorio, Técnico Superior Licenciado en Ciencias. Responsable del cumplimiento global del procedimiento y de la elaboración de resultados.

El Analista Instrumentista, nivel de formación FP II rama laboratorio o equivalente. Responsable de la realización del proceso.

	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO EN EDÓMETRO	HOJA 12 DE 12
		REVISIÓN 0

6 REFERENCIAS

ASTM D 2435 (1980): Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Soils. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones, Sect. 4, *ASTM*, Philadelphia, PA.

JIMÉNEZ, J.A. & JUSTO, J.L., de (1971): Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas. *Ed. Rueda*. pp. 137-145.

Norma UNE 103-300-93: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

7 ANEXOS

Formato: Presión de hinchamiento en edómetro.

PRESIÓN DE HINCHAMIENTO EN EDÓMETRO (Procedimiento IMA/X8/BI-F21)

REFERENCIA.....

Muestra		Humedad	%
Edómetro		Brazo palanca	
Diámetro	cm	Superficie	cm ²
Altura	cm	Volumen	cm ³
Densidad	g/cm ³	Peso seco teórico	g
Muestra pesada	g	Peso anillo	g
Anillo+muestra	g	Dispositivo/P comp.	

Balanza ref.	09218	Fecha		Agua	
--------------	-------	-------	--	------	--

MONTAJE EN EDÓMETRO

Fecha	Hora	Pesas	kg	Lectura	Presión kg/cm ²

DESMONTAJE

Fecha		Balanza	09218	Calibre	24481
Altura que sobresale (4)				Altura pistón	mm
Anill+Pist+Filtro+Muestra		g		Altura pastilla	mm
Filtro		g		Peso muestra	g
Pistón		g		Peso muestra (calculado)	g
Anillo		g		Altura pastilla (calculada)	cm

HUMEDAD FINAL	Balanza ref.	09218	Estufa	23410
---------------	--------------	-------	--------	-------


Tara	g	T+S+A	g	Suelo	g
T+S	g	Agua	g	Humedad final	%

CÁLCULOS

Peso seco	g	Densidad inicial	g/cm ³
Humedad inicial	%	Densidad final	g/cm ³

ANEXO III

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL HINCHAMIENTO BAJO CARGA

	DEPARTAMENTO DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA ENERGÍA	HOJA 1 DE 13
	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE EMPLAZAMIENTOS	REVISIÓN 0
PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO: PE-IA-CH-3		

TITULO: HINCHAMIENTO BAJO CARGA	
COPIA CONTROLADA N°:	
ASIGNADA A:	
REDACTADO POR: (*) María Victoria Villar Galicia	
REVISADO POR: (*)	
CONFORMADO POR CALIDAD: (*)	
APROBADO POR: (*)	

(*) NOMBRE(S). FIRMA(S). FECHA(S)

[illegible]

INDICE

1	OBJETO	4
2	ALCANCE	4
3	DEFINICIONES.....	4
4	DESCRIPCIÓN	5
4.1	Instrumentación y materiales	5
4.2	Condiciones de operación.....	7
4.3	Calibrado	7
4.4	Metodología.....	8
4.4.1	Pasos previos	8
4.4.2	Preparación de la muestra.....	8
4.4.3	Montaje	9
4.4.4	Desarrollo del ensayo	9
4.4.5	Desmontaje	10
4.5	Observaciones finales	11
4.6	Cálculo de resultados.....	11
4.7	Almacenamiento de muestras	12
4.8	Registro de resultados.....	12
4.9	Fecha de revisión	12
5	RESPONSABLES	12
6	REFERENCIAS	13
7	ANEXOS	13

Ciemat	HINCHAMIENTO BAJO CARGA	HOJA 4 DE 13
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-3		

1 OBJETO

Establecer un procedimiento para la realización del ensayo de saturación bajo carga fija, para conocer su deformabilidad (hinchamiento o consolidación).

2 ALCANCE

El presente procedimiento afecta al personal del Proyecto de Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos que precise realizar el ensayo de “Hinchamiento bajo carga” en la Instalación 542 “Laboratorio de Mecánica de Suelos”. El método es aplicable a suelos inalterados o remoldeados, en los que el tamaño máximo de partícula no sea superior a la quinta parte de la altura de la probeta (2 mm).

3 DEFINICIONES

Los materiales arcillosos se caracterizan por su gran deformabilidad al hidratarse, ya que las partículas incorporan el agua en su estructura aumentando la distancia entre interláminas. La deformación experimentada por el suelo en contacto con el agua dependerá del tipo de mineral y su proporción en el suelo, de su densidad y humedad inicial, de la orientación de las partículas, del tipo y cantidad de cationes adsorbidos, de la composición del agua de saturación y de la carga vertical a la que sea sometido simultáneamente a la hidratación. Así mismo, el historial de tensiones del suelo y la temperatura son factores influyentes.

La capacidad de deformación de un suelo se determina en el equipo edométrico. La muestra se introduce en un anillo portamuestras que impide su deformación lateral, confinada entre dos piedras porosas en la parte inferior y superior. El pistón superior, solidario con una piedra porosa, está conectado a un vástago de carga cuyo desplazamiento, o bien el del mismo pistón, se puede medir con exactitud por medio de un comparador. Se aplica a la muestra la carga deseada mediante un brazo de palanca y se vierte agua en la celda, de manera que se produzca la saturación de la muestra a través de la placa porosa inferior. Se va registrando la deformación indicada por el comparador a intervalos de tiempo progresivamente mayores, hasta alcanzarse la estabilización. La relación entre el incremento de altura final experimentado por la muestra en equilibrio con la carga aplicada, y su altura inicial, da el valor de la deformación experimentada por el material al saturarse bajo la carga a la que se realizó el ensayo (Jiménez & Justo 1971).

4 DESCRIPCIÓN

4.1 Instrumentación y materiales

Los detalles de los requisitos mecánicos y dimensionales de cada elemento están reseñados en la Norma UNE 103-405-94.

- Prensa uniaxial para compactación, con capacidad hasta 50 Tm y/o gato hidráulico.
- Molde de compactación para fabricar pastillas remoldeadas en el interior de los anillos del edómetro, fabricado en acero indeformable (Figura 1 y Figura 2).

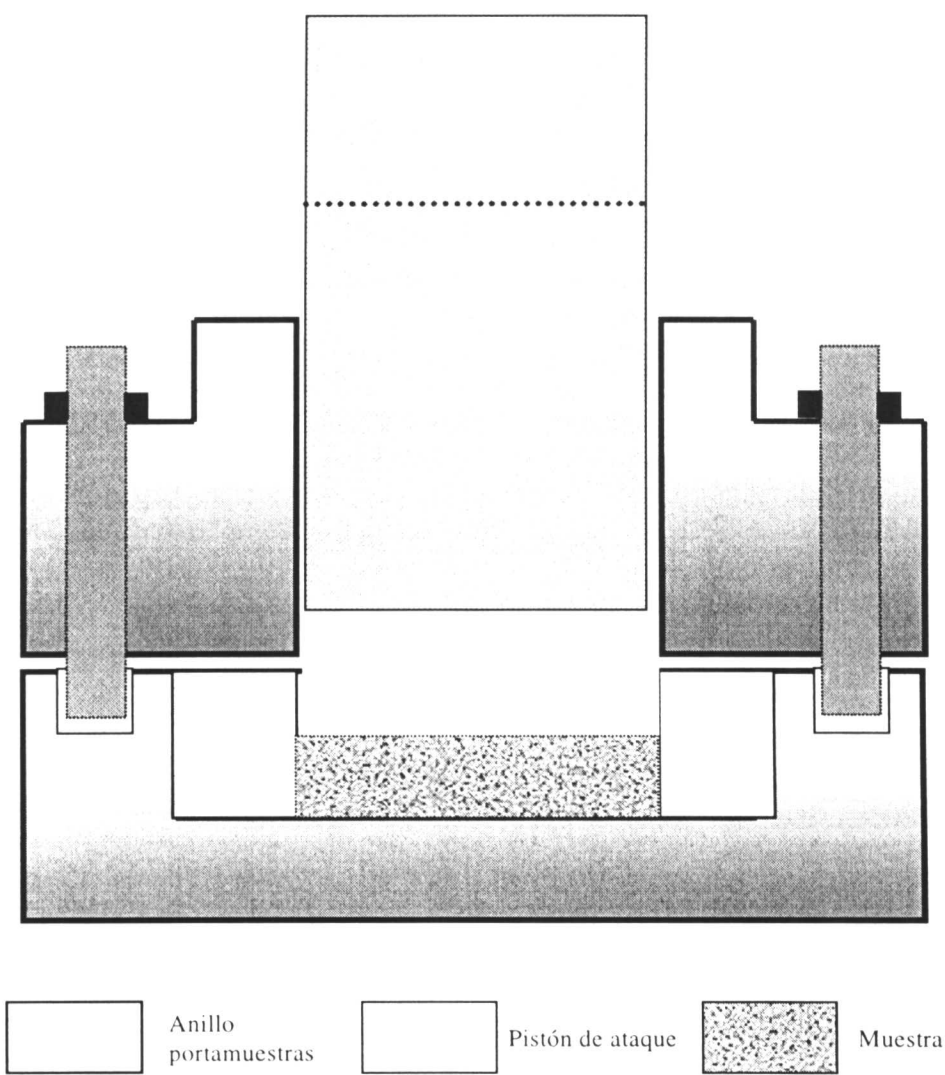


Figura 1: Sección esquemática del molde de compactación

Ciemat	HINCHAMIENTO BAJO CARGA	HOJA 6 DE 13
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-3		

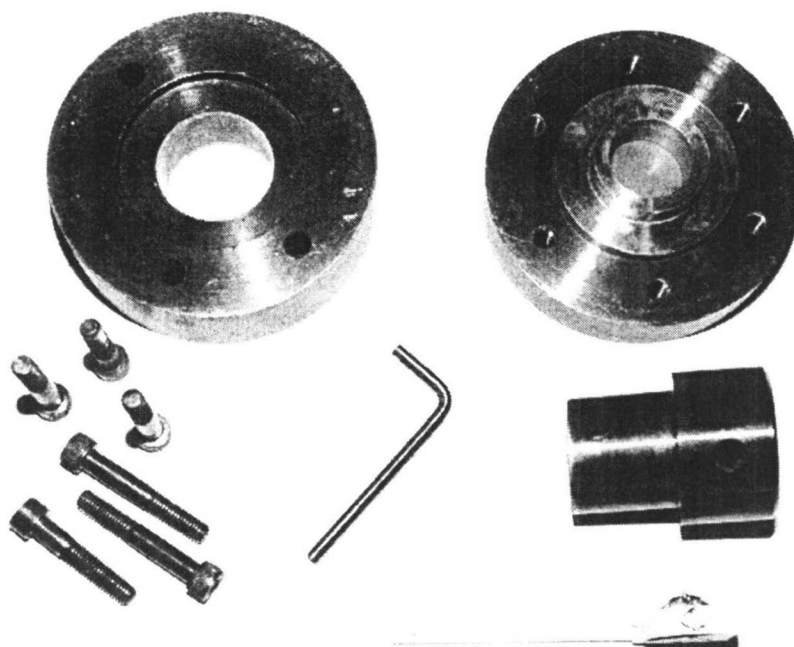


Figura 2: Molde de compactación

- Anillos cortadores y extractores de las dimensiones apropiadas para preparar muestras inalteradas.
- Equipo edométrico que permita la aplicación de cargas constantes a través de un sistema de palancas con pesas. El brazo de palanca está comprendido entre 1:7 y 1:10
- Celda edométrica (Figura 3), equipada con piedras porosas superior e inferior, anillos portamuestras y sus correspondientes anillos fijadores y comparador que aprecie centésima o milésima de milímetro.
- Discos de papel de filtro Whatman 54, del diámetro de la muestra.
- Agua destilada.
- Balanza, de capacidad superior a 500 g y que aprecie $\pm 0,01$ g, y recipientes para pesado.
- Estufa regulable a 110°C y recipientes para secado en estufa.
- Herramientas: llaves Allen para los moldes de compactación y fijas para la celda del edómetro.

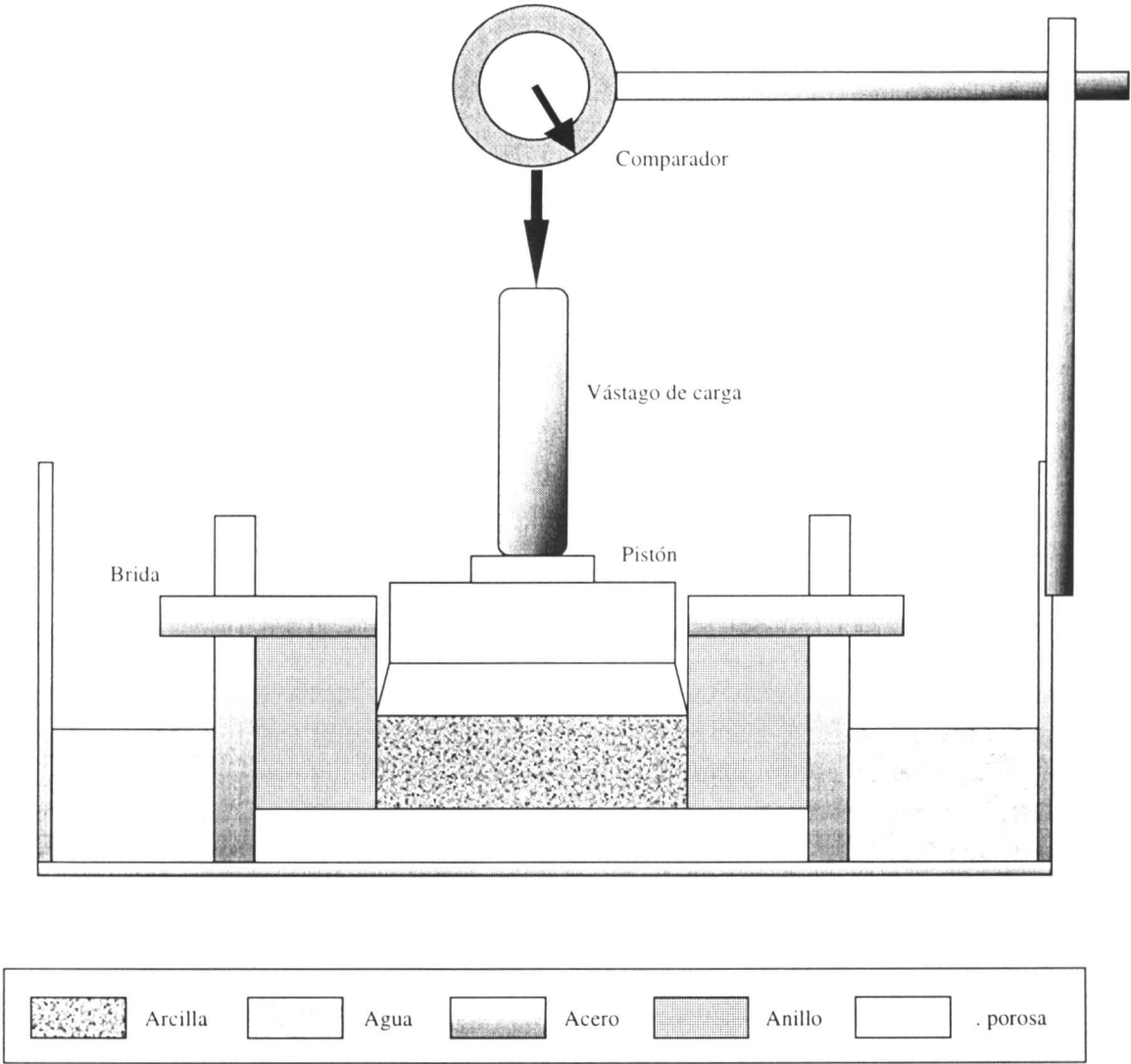



Figura 3: Sección esquemática de la celda edométrica

4.2 Condiciones de operación

El ensayo de hinchamiento bajo carga debe realizarse a temperatura constante, preferiblemente entre 20 y 25 °C, ya que ésta influye en la medida. Este dato deberá indicarse en el resultado.

4.3 Calibrado

Se realizará un calibrado periódico de estufa, balanza y manómetros, así como del brazo de palanca de los edómetros. Para esto último se utilizará un anillo dinamométrico que permita determinar con precisión la presión aplicada en función de las pesas colocadas en el colgadero.

	HINCHAMIENTO BAJO CARGA	HOJA 8 DE 13
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-3		

El equipo edométrico puede sufrir cierta deformación instantánea al aplicarse la carga y al descargar. Esta deformación debe medirse cuidadosamente para poder discernir en cada momento qué parte de la deformación medida corresponde efectivamente a la muestra y cuál ha de sustraerse por corresponder al aparato. La forma de hacerlo es calibrar el equipo utilizando una pastilla, de la misma altura que la muestra con que se trabaja habitualmente y de diámetro 1 mm menor, no deformable bajo las cargas aplicadas, de acero, que se coloca en el lugar de la muestra. El tarado ha de hacerse también incluyendo el papel de filtro y saturándolo con agua destilada, tal y como se hace en el ensayo con muestra (ASTM D2435). A continuación se procede a la carga del equipo y se registra la deformación observada al estabilizarse. La deformación del equipo ha de sustraerse de la lectura registrada inmediatamente después de la aplicación de la carga.

Hay que señalar que el calibrado del equipo no es exactamente repetitivo, incluso aunque se lleve a cabo en las mismas condiciones, por lo que ha de realizarse varias veces con el fin de obtener valores medios.

4.4 Metodología

4.4.1 Pasos previos

Las piedras porosas deben estar limpias y secas.

El ensayo se comenzará preferiblemente a primera hora de la mañana, para tener tiempo suficiente en el transcurso de la jornada para registrar las deformaciones iniciales. Todos los datos del ensayo se anotarán en el impreso correspondiente: referencia del edómetro, brazo de palanca, dimensiones de la muestra, fecha y hora de inicio, muestra utilizada, densidad y humedad de ésta, etc.

Se calcula el peso que será necesario colocar en el colgadero, según la presión a la que se desee realizar el ensayo. La equivalencia entre presión (P) y pesas, es función del brazo de palanca del equipo (B.P.) y de la sección de la muestra (S), y viene dada por la expresión:

$$P = \frac{\text{pesas} \times \text{B.P.}}{S}$$

4.4.2 Preparación de la muestra

Antes de preparar la muestra ha de pesarse el anillo portamuestras y comprobar su diámetro interno y altura, datos que se anotarán en el impreso correspondiente.

En el caso de muestras inalteradas será necesario adecuarlas al diámetro de los anillos del edómetro tallándolas con el anillo cortador conveniente, procurando no modificar ni su humedad ni su densidad. Una vez tallada la pastilla, se pasa con ayuda de un extractor al anillo portamuestras, se comprueban su altura final y peso y se anotan.

Para muestras remoldeadas se prepara una pastilla de la densidad y humedad requeridas, compactándola directamente en el interior del anillo del edómetro:


1. Se calcula el peso de muestra necesario para fabricar la pastilla con la densidad y humedad deseadas, teniendo en cuenta el volumen final esperado.
2. Se toma una muestra representativa y se pesa la cantidad necesaria.
3. Se acopla el anillo portamuestras del edómetro en el molde y se introduce en él la muestra, con ayuda de un embudo si es necesario, pero evitando la granoselección, y se compacta en la prensa uniaxial o con un gato hidráulico, anotando la carga aplicada.
4. Se desmonta el molde de compactación, se extrae el anillo portamuestras y se comprueba que la pastilla obtenida tiene la altura deseada con ayuda de una pastilla de bronce (u otro material rígido) de la altura apropiada. Se anota el peso del conjunto del anillo y la muestra y se guarda en bolsa de plástico cerrada hasta su montaje en la celda, que ha de ser lo más rápido posible.

4.4.3 Montaje

1. Montaje de la celda: se coloca la placa porosa inferior en la celda y sobre ella un papel de filtro de las dimensiones de la muestra o mayor. Sobre éste se coloca el anillo portamuestras con la pastilla en su interior. Se fija el conjunto con la brida superior de la celda del edómetro y se coloca el pistón con la piedra porosa superior.
2. El conjunto se lleva al alojamiento del edómetro, se fija el vástago de carga, se coloca una pesa que ocasione una pequeña presión de ajuste (250 g), se nivela el brazo de palanca y se coloca el comparador, ajustando la lectura a un valor intermedio de su recorrido (500 ó 5000).
3. Se aplica la carga vertical deseada, mediante la colocación en el colgadero de las pesas necesarias, y se anota la lectura del comparador.
4. Inmediatamente se llena la celda de agua destilada de manera que quede cubierta la piedra porosa inferior, pero no la superior, y se comienzan a tomar las lecturas del comparador a intervalos de tiempo progresivamente mayores: 10", 15", 20", 30", 45", 1', 2', 3', 5', 7', 10', 15', 20', 30', 45', 1 h, 2 h, 3 h, 5 h, 7 h, 10 h, 24 h y días sucesivos.

4.4.4 Desarrollo del ensayo

Se toman lecturas diariamente, hasta que no se observe deformación durante al menos 24 horas. Ha de vigilarse el nivel de agua en la celda, y reponerlo si se ha producido evaporación. En materiales de baja permeabilidad, como las arcillas en general y las bentonitas en particular, la estabilización puede producirse para tiempos superiores a una semana, ya que es difícil llegar a saturar toda la muestra, especialmente cuándo sólo se satura a partir de la superficie inferior. En ocasiones, hacia el final del ensayo, se registran deformaciones de signo variable, que se atribuyen a los cambios de

	HINCHAMIENTO BAJO CARGA	HOJA 10 DE 13
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-3		

temperatura del laboratorio, a los que el ensayo es muy sensible, puesto que modifican las propiedades del agua. El tiempo necesario para que la deformación se estabilice depende, para un mismo material, de la densidad seca de la muestra, de su altura y de la carga aplicada. Es por ello conveniente, a la hora de elegir la altura inicial de la muestra, llegar a un compromiso entre el tiempo esperado de saturación y la disminución de representatividad que supone utilizar muestras más pequeñas.

4.4.5 Desmontaje

Una vez alcanzado el equilibrio, el ensayo se considera finalizado, anotándose fecha y lectura final del comparador en el impreso y procediendo a su desmontaje:

1. Vaciar el agua de la celda.
2. Quitar la carga.
3. Liberar la celda de su alojamiento y quitar el comparador.
4. Desmontar la celda en un lugar próximo a la balanza. Es necesario conocer con la mayor precisión posible tanto la altura como el peso final de la muestra. La altura puede variar fácilmente durante el proceso de desmontaje, sobre todo si ha habido una liberación grande de carga. Para evitar al máximo la discrepancia entre la altura real de la muestra al final del ensayo edométrico y la altura medida una vez extraída de la celda, en cuanto el conjunto formado por el anillo, la muestra y la piedra porosa se extrae de la celda, se mide la altura del pistón solidario a la piedra porosa superior que sobresale con respecto al anillo portamuestras (h_s). Conociendo la altura del pistón (h_p) y la altura del anillo portamuestras (h_a), se puede determinar con precisión la altura de la muestra antes de extraerla del anillo (Figura 4):

$$h_m = h_s + h_a - h_p$$

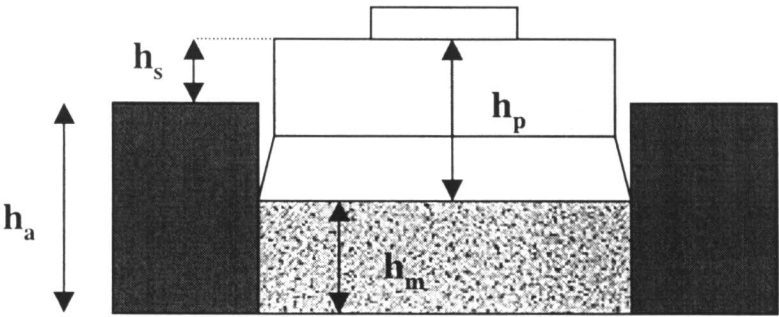


Figura 4: Medidas tomadas después de desmontar el anillo portamuestras del edómetro

5. Con el fin de que el peso final medido coincida efectivamente con el peso de la muestra, se pesa inicialmente el conjunto formado por el anillo portamuestras, la muestra, el papel de filtro

inferior y el pistón superior. Después se extrae la muestra del anillo y se pesan todos los componentes, limpios de restos de muestra, por separado. La diferencia entre el peso inicial del conjunto y la de todos los componentes da el peso final de la muestra (Pf). La muestra pesada y medida, o parte de ella, se seca en estufa a 110 °C para determinar su humedad final (wf)(Norma UNE 103-300). En general se utilizará la totalidad de la muestra para determinar la humedad, excepto si se requiere muestra para algún tipo de determinación específica (porosimetría, geoquímica). En este último caso, se partirá la muestra, y la parte que no se utilice para determinar la humedad, se envolverá en papel parafinado para preservar su humedad, convenientemente rotulada.

Todos los datos han de anotarse en el impreso correspondiente (cf. Anexos).

4.5 Observaciones finales

- Pesar la muestra a las 24 horas y anotar el dato en el impreso correspondiente.
- La celda del edómetro se guardará limpia y seca en su alojamiento.
- Las piedras porosas se meten en agua durante unas horas para que se limpien de partículas arcillosas. Periódicamente se limpiarán en el baño de ultrasonidos, para lo que se introducen en un vaso de precipitados con agua destilada dentro del baño y se ultrasonan de 2 a 5 minutos. Se cambia el agua destilada del vaso de precipitados y se repite el proceso. Una vez limpias se mantienen en desecador.

4.6 Cálculo de resultados

En el impreso correspondiente al ensayo se realizan los siguientes cálculos:

1. A partir del peso final de muestra (Pf) y de la humedad final determinada (wf) se calcula el peso seco (Ps).

$$Ps = \frac{Pf}{1 + \frac{wf}{100}}$$

2. A partir del peso seco determinado se comprueba la densidad y la humedad iniciales.
3. La densidad seca final (ρ_d) se calcula dividiendo el peso seco por el volumen final calculado a partir del diámetro (ϕ) y la altura (h) medidos.

$$\rho_d = \frac{P \text{ seco}}{\pi \times \left(\frac{\phi \text{ final}}{2}\right)^2 \times h \text{ final}}$$

Ciemat	HINCHAMIENTO BAJO CARGA	HOJA 12 DE 13
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-3		

En la hoja de cálculo correspondiente al ensayo se determina, para cada lectura tomada a diferentes tiempos:

1. La equivalencia entre lectura del comparador y altura de la muestra, teniendo en cuenta la lectura inicial del comparador, su apreciación y la altura inicial de la pastilla. Una vez conocida la altura de la muestra en cada momento se puede calcular su densidad seca, y a partir de ésta y del peso específico del material se calcula su índice de poros.
2. La deformación en cada momento (ϵ_t) se calcula como la relación entre la variación de altura experimentada por la muestra (diferencia entre altura inicial y altura en cada momento, Δh) y la altura inicial (h_i), expresada en tanto por ciento, considerándose de signo negativo los aumentos de altura.

$$\epsilon_t = \frac{\Delta h}{h_i} = \frac{h_i - h_t}{h_i}$$

Los resultados pueden presentarse como una gráfica semilogarítmica de la evolución del porcentaje de deformación o del índice de poros en función del tiempo (curvas de consolidación o hinchamiento).

4.7 Almacenamiento de muestras

Una vez determinada la humedad las muestras se desechan.

4.8 Registro de resultados

Los resultados intermedios y finales, así como cualquier otro tipo de anotación de interés, deben ser registrados en los impresos y hojas de cálculo correspondientes (cf. impresos adjuntos).

4.9 Fecha de revisión

Este procedimiento se revisará en tres años a partir de la fecha de su aprobación.

5 RESPONSABLES

Los responsables del cumplimiento de este procedimiento y de la realización práctica de las tareas descritas en el mismo serán:

Ciemat	HINCHAMIENTO BAJO CARGA	HOJA 13 DE 13
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-3		

El Jefe de Laboratorio, Técnico Superior Licenciado en Ciencias. Responsable del cumplimiento global del procedimiento y de la elaboración de resultados.

El Analista Instrumentista, nivel de formación FPPII rama laboratorio o equivalente. Responsable de la realización del proceso.

6 REFERENCIAS

ASTM D 2435 (1980): Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Soils. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones, Sect. 4, ASTM, Philadelphia, PA.

JIMÉNEZ, J.A. & JUSTO, J.L., de (1971): Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas. Ed. Rueda. pp. 137-145.

Norma UNE 103-300-93: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

Norma UNE 103-405-94: Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro.

7 ANEXOS

Formato PE-IA-CH-3.1: Ensayo en edómetro.

Formato PE-IA-CH-3.2: Lecturas del ensayo en edómetro.



PROYECTO.....

ENSAYO EN EDÓMETRO (1/2) (Procedimiento PE-IA-CH-3)

REFERENCIA.....

Muestra		Humedad	%
Edómetro		Brazo palanca	
Diámetro	cm	Superficie	cm ²
Altura	cm	Volumen	cm ³
Densidad	g/cm ³	Peso seco teórico	g
Muestra pesada	g	Peso anillo	g
Anillo+muestra	g	Dispositivo/P comp.	

Balanza ref.	09218	Fecha		Agua	
--------------	-------	-------	--	------	--

ESCALONES

Escalón	Pesas (kg)	Presión (kg/cm ²)	Fecha	

DESMONTAJE

Fecha		Balanza	09218	Calibre	24481
Altura que sobresale (4)				Altura pistón	mm
Anill+Pist+Filtro+Muestra	g			Altura pastilla	mm
Filtro	g			Peso muestra	g
Pistón	g			Peso muestra (calculado)	g
Anillo	g			Altura pastilla (calculada)	cm

HUMEDAD FINAL	Balanza ref.	09218	Estufa	23410
---------------	--------------	-------	--------	-------

Tara	g	T+S+A	g	Suelo	g
T+S	g	Agua	g	Humedad final	%

CÁLCULOS

Peso seco	g	Densidad inicial	g/cm ³
Humedad inicial	%	Densidad final	g/cm ³

LECTURAS DEL ENSAYO EN EDÓMETRO					
Referencia		Edómetro		Tipo agua	

Escalón					
Pesas kg					
Presión kg/cm ²					
Fecha					
Hora					
0 s					
10 s					
15 s					
20 s					
30 s					
45 s					
1 m					
2 m					
3 m					
5 m					
7 m					
10 m					
15 m					
20 m					
30 m					
45 m					
1 h					
2 h					
3 h					
5 h					
7 h					
10 h					
1 d					
2 d					
3 d					
4 d					
5 d					
6 d					
7 d					
8 d					
9 d					
10 d					
11 d					
12 d					
13 d					
14 d					
15 d					
16 d					
17 d					


Realizado.....

Revisado.....

Fecha.....

ANEXO IV

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS

	DEPARTAMENTO DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA ENERGÍA	HOJA 1 DE 15
	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE EMPLAZAMIENTOS	REVISIÓN 0
PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PE-IA-CH-1		

TITULO: DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS

COPIA CONTROLADA N°:

ASIGNADA A:

REDACTADO POR: (*)	María Victoria Villar Galicia
REVISADO POR: (*)	
CONFORMADO POR CALIDAD: (*)	
APROBADO POR: (*)	

Este Procedimiento anula y sustituye al Procedimiento IMA/X8/BI-F18 “Relación succión/humedad a 20 °C en celdas de membrana”

[illegible]

Ciemat	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 3 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

INDICE

1	OBJETO	4
2	ALCANCE	4
3	PRINCIPIO DEL MÉTODO	4
3.1	Celdas de membrana.....	5
3.2	Desecadores	5
4	DESCRIPCIÓN	6
4.1	Instrumentación y materiales.....	6
4.1.1	Material específico para el ensayo en celdas de membrana	7
4.1.2	Material específico para el ensayo en desecadores.....	9
4.2	Condiciones de operación y calibrado.....	10
4.3	Metodología.....	10
4.3.1	Preparación de la muestra.....	10
4.3.2	Montaje inicial	10
4.3.3	Desarrollo del ensayo: pesadas intermedias	12
4.3.4	Curva de retención.....	13
4.3.5	Averías.....	13
4.3.6	Desmontaje	13
4.4	Cálculo de resultados.....	14
4.5	Almacenamiento de muestras	14
4.6	Registro de resultados.....	14
4.7	Fecha de revisión	14
5	RESPONSABLES	15
6	REFERENCIAS	15
7	ANEXOS	15

Ciemat	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 4 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

1 OBJETO

En este Procedimiento se describe la manera de obtener la relación entre succión y humedad a 20 °C, así como los puntos de la curva de retención de un suelo. El método utilizado depende del rango de succión considerado: para succiones entre 0,1 y 14 MPa se utilizan las celdas de membrana, y para succiones superiores a 3 MPa, los desecadores con disolución de ácido sulfúrico. Además de obtenerse la relación succión/humedad sometiendo diferentes muestras de un mismo material a succiones diferentes, puede obtenerse también la curva de retención de ese mismo material, que es la evolución de la relación succión/humedad que experimenta una misma muestra al ser sometida a trayectorias de aumento o disminución de la succión (hidratación o secado). Ambos ensayos se realizan según una metodología similar. Cuando se realiza el ensayo según se describe en este procedimiento, la muestra no está confinada durante la aplicación de la succión. Esto supone que el volumen de la muestra puede variar durante el ensayo, según si toma o cede agua.

2 ALCANCE

El presente procedimiento afecta al personal del Programa de Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos que precise realizar el ensayo de “Obtención de la relación succión/humedad en suelos” en la Instalación 630 “Laboratorio de Materiales Subsaturados”. El método es aplicable a suelos remoldeados o inalterados cuya saturación se produzca para succiones no inferiores a 0,1 MPa.

3 PRINCIPIO DEL MÉTODO

La relación entre succión y humedad de una muestra informa sobre la capacidad de retención de agua que ésta tiene. El procedimiento para establecer esta relación consiste básicamente en estabilizar la muestra a una succión dada y determinar su humedad una vez alcanzado el equilibrio. Se utilizan dos técnicas diferentes para imponer la succión según el rango en que se trabaje: la traslación de ejes (celdas de membrana: Escario & Sáez 1973) y la imposición de una humedad relativa (celdas con depósito para disolución de ácido sulfúrico: Esteban & Sáez 1988). En ambos casos, la succión se impone, pero no se mide, puesto que no existen técnicas convencionales para medir succiones elevadas en materiales muy expansivos. El control de la succión (s) se realiza cambiando los valores de la presión de aire (u_a) o de la presión de agua (u_w) en los poros de la muestra, puesto que los cambios de succión vienen dados por la diferencia entre ambas ($s=u_a-u_w$).

Ciemat	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 5 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

3.1 Celdas de membrana

El método está basado en el principio de traslación de ejes, que consiste en aumentar la succión mediante el aumento de presión en la fase gaseosa (Richards 1941). La muestra se coloca en una celda en contacto con agua a presión atmosférica a través de una membrana permeable al agua pero no al gas. Inmediatamente se aumenta la presión en la celda inyectando gas a la presión deseada, lo que aumenta la presión de aire en los poros de la muestra. Esta nueva situación fuerza a la muestra a intercambiar agua a través de la membrana hasta alcanzar de nuevo el equilibrio. Puesto que los cambios de succión vienen dados por la diferencia entre la presión de aire en los poros y la presión de agua, al aplicar una presión de aire a la muestra, se introduce un aumento de u_a , mientras que u_w permanece igual a la presión atmosférica. De esta manera, la succión varía la misma cantidad que la presión de gas. La membrana permite el paso de iones, por lo que mediante este método sólo es posible controlar la succión matricial, y no la osmótica. Debido a las limitaciones mecánicas de la celda, sólo es posible aplicar succiones menores de 14 MPa. En este procedimiento se utiliza como gas nitrógeno industrial.

3.2 Desecadores

El método de imposición de una humedad relativa (HR) se basa en que ésta condiciona la presión de agua y gas en los poros (u_w y u_a). Esta humedad puede imponerse mediante disoluciones de ácido sulfúrico (aunque cualquier otra disolución de actividad de agua conocida podría utilizarse). La muestra intercambia agua con la atmósfera hasta que alcanza el equilibrio termodinámico con la presión de vapor de la disolución. La presión en los poros de la muestra (s , en MPa) se relaciona con la actividad de agua de la disolución ($a_w=HR/100$) mediante la ley de Kelvin:

$$s = -10^{-6} \frac{R \times T}{V_w} \ln \left(\frac{HR}{100} \right)$$

donde R es la constante universal de los gases (8,3143 J/mol·K), T la temperatura absoluta y V_w , el volumen molar del agua ($1,80 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$).

La relación entre la actividad de la disolución (a_w) y el porcentaje en peso de ácido sulfúrico utilizado para prepararla (p) se refleja en tablas experimentales (Gmitro & Vermeulen 1964). Esta relación depende de la temperatura, por lo que ésta ha de permanecer constante durante los ensayos. Para 20 °C la relación puede ajustarse a una ecuación polinómica de cuarto grado:

$$a_w = 7 \cdot 10^{-8} \times p^4 - 6 \cdot 10^{-6} \times p^3 - 0,0001 \times p^2 - 0,0019 \times p + 0,9927$$

La transferencia de agua entre la arcilla y la atmósfera puede hacer variar la densidad de la disolución, por lo que ésta ha de comprobarse antes y después de la estabilización, lo que se realiza con picnómetros. Existe una relación experimental entre el peso específico de la disolución (o densidad, d) y el porcentaje en peso de sulfúrico de la disolución (p , que a su vez depende de la

Ciemat	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 6 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

actividad a_w), dependiente de la temperatura (Lide 1995). Para 20 °C esta relación se ajusta a una ecuación exponencial:

$$p = 145,9 \times \ln(d) + 0,9807$$

Con este método pueden obtenerse succiones entre 3 y 500 MPa.

4 DESCRIPCIÓN

4.1 Instrumentación y materiales

- **Prensa uniaxial o gato hidráulico.** Para fabricación de las pastillas.
- **Molde de compactación.** Consta de dos piezas unidas por tornillos y de un pistón marcado, fabricados en acero endurecido (Figura 1). El diámetro interno es 3,03 cm y la altura resultante 1,23 cm.
- **Cápsulas de porcelana o vidrio previamente taradas**
- **Balanza.** Con capacidad mínima de 50 g y precisión $\pm 0,001$ g.
- **Estufa.** Ha de mantener una temperatura entre 105 y 110°C.
- **Herramientas.** Llave Allen nº 8 para los tornillos del molde de compactación.
- **Varios.** Espátula, tijeras, disco de cobre de la dimensión de la piedra porosa de la celda (8,5 cm), cápsulas de porcelana, frasco lavador con agua destilada, recipiente con gel de sílice, calibre, embudo de plástico, papel de laboratorio.

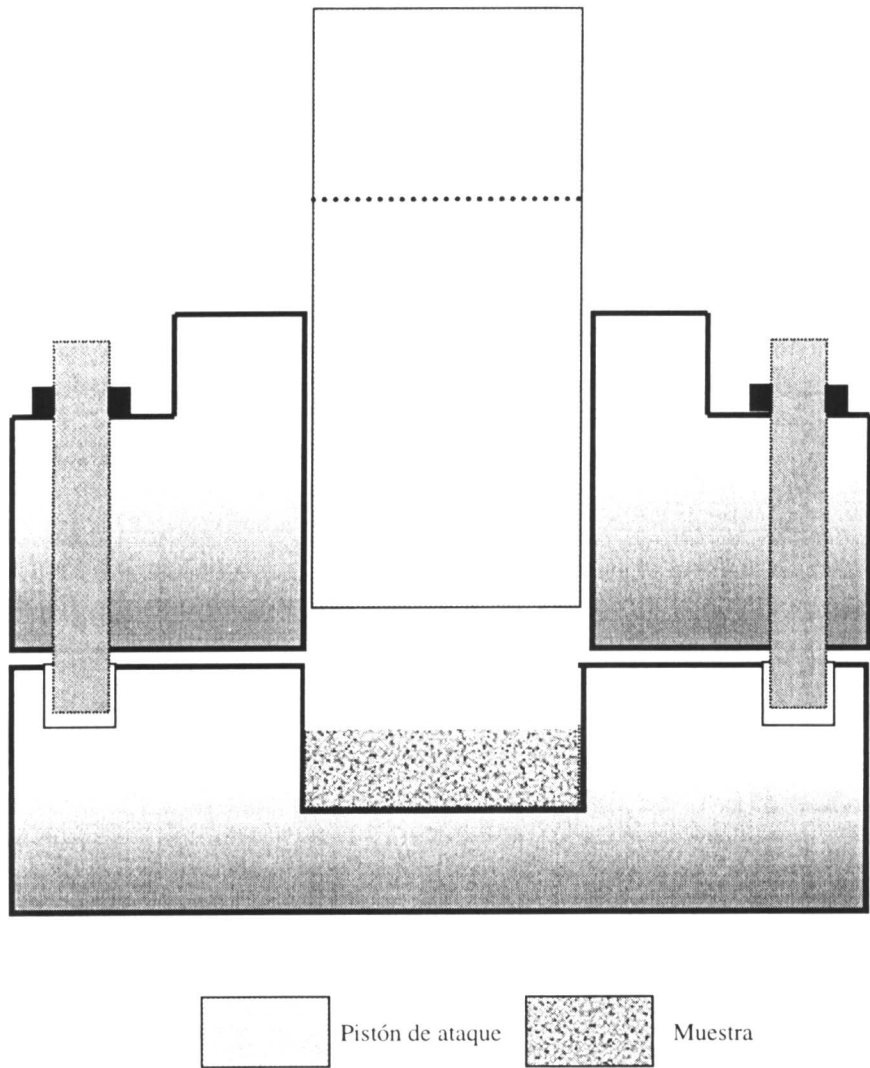



Figura 1: Sección esquemática del molde de compactación

4.1.1 Material específico para el ensayo en celdas de membrana

- **Celda de membrana.** Se trata de celdas de acero inoxidable constituidas por una base plana y un cuerpo cilíndrico que deja una cavidad en su interior de 49 cm³ (Figura 2). Tapa y cuerpo se ajustan mediante tornillos y se asegura la estanqueidad del conjunto con una junta tórica entre ambos. El cuerpo dispone de una toma de gas cerrada con llave de alta presión y de un manómetro para presiones de hasta 160 bar que permite conocer la presión en el interior de la celda. La parte inferior de la celda lleva encastrada una piedra porosa por debajo de la cual hay tomas de agua conectadas a un depósito a presión atmosférica.
- **Depósito de agua destilada conectado a bomba.** La bomba puede ser peristáltica o centrífuga, su función es la de renovar el agua en contacto con la membrana y hacer circular las burbujas de

	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 8 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

aire que puedan difundir a través de ella. El agua debe llevar añadido formaldehído al 2% para proteger la membrana de la proliferación de organismos.

- **Papel de filtro.** Whatman 54, recortado según el diámetro de la celda (8,5 cm).
- **Herramientas.** Llave Allen nº 10 para los tornillos de la celda. Llave fija nº 19 y/o inglesa para apretar conexiones de la manguera de alta presión.
- **Membranas semipermeables** (tipo Visking de la casa Medicell Int. Ltd. o Spectra/Por de la casa Spectrum). Estas membranas, de celulosa regenerada, tienen una naturaleza amorfa de tipo gel, y un diámetro de poro de 2,4 nm, por lo que son flexibles y adecuadas para trabajos de filtración y ósmosis. Se han de utilizar previamente lavadas y reblandecidas, y recortadas según el diámetro de la piedra porosa inferior, para lo que puede ser útil disponer de un disco de cobre recortado según estas dimensiones que sirva de plantilla.
- **Instalación de gas a alta presión.** Bombona de nitrógeno industrial de 200 bar instalada en caseta exterior. Línea de alta presión hasta el interior del laboratorio. LTH con salida y entrada reguladas hasta 200 bar y otro con salida regulada hasta 10 bar. Manguera de alta presión para conexión del LTH con la celda.

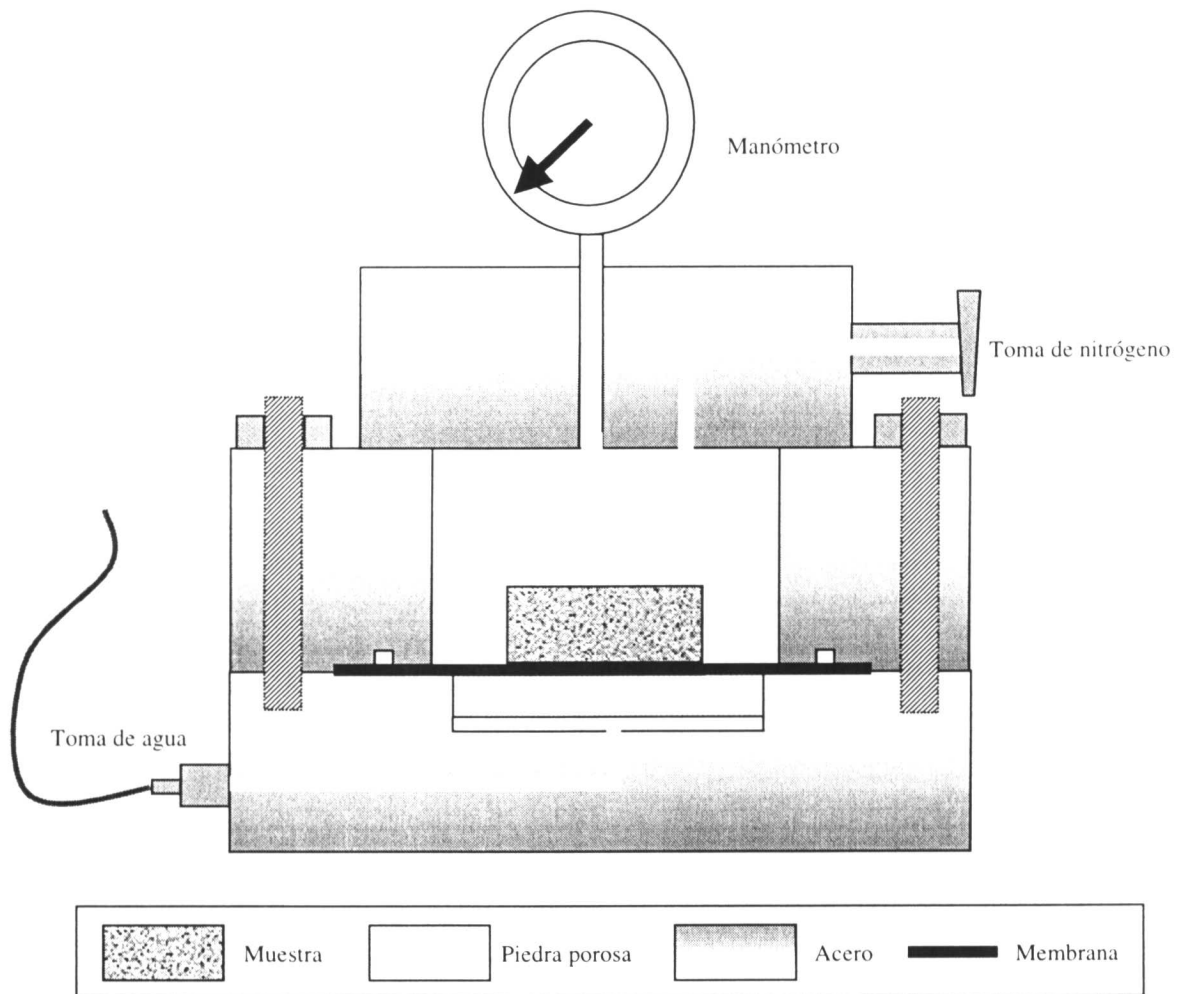


Figura 2: Sección esquemática de una celda de membrana

4.1.2 Material específico para el ensayo en desecadores

- **Desecadores de vacío.** De diámetro interno superior a 20 cm.
- **Bomba de vacío.**
- **Vasos de precipitado, agua destilada y ácido sulfúrico** (al 96 ó 98 %). Para preparar las disoluciones.
- **Picnómetros para líquidos.** Tarados y referenciados, para comprobar la densidad de las disoluciones.

	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 10 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

4.2 Condiciones de operación y calibrado

Las celdas y desecadores deben mantenerse en un recinto con temperatura controlada y regulada a 20 °C. A esta temperatura deben realizarse también las operaciones de pesado de muestra.

Se realizará un calibrado periódico de estufa, balanza y manómetros.

4.3 Metodología

4.3.1 Preparación de la muestra

Se calcula el peso de muestra necesario para fabricar la pastilla con la densidad y humedad deseadas, teniendo en cuenta el volumen útil del molde de compactación que es 8,87 cm³. Se toma una muestra representativa y se pesa la cantidad necesaria. Se introduce en el molde con ayuda de un embudo si es necesario y se compacta en la prensa uniaxial o con un gato hidráulico. Se saca la pastilla del molde y se anota peso, diámetro y altura. Se guarda en bolsa de plástico cerrada hasta su montaje en la celda, que ha de ser lo más rápido posible.

4.3.2 Montaje inicial

En el caso de querer determinar la curva de retención, se definirá si se va a comenzar con la muestra en estado seco, saturado, o con su humedad natural, y si la trayectoria a seguir será de aumento o disminución de la succión, lo que depende de las condiciones del terreno que se quieran reproducir y del tipo de conocimiento que se quiera obtener del material. Así mismo, se determinan con antelación los valores de succión que se van a aplicar (escalones), cuyo número dependerá del detalle con que se requiera definir la curva y de las características de la muestra.

4.3.2.1 Celdas de membrana

Como pasos previos al montaje, se preparará el material y los equipos necesarios:

1. Lavar un cuadrado de membrana en agua corriente durante varias horas. Unos minutos antes del montaje lavarla con agua destilada, cortarla a la medida del disco de cobre y volverla a dejar en agua destilada.
2. Encender la balanza, comprobar que está equilibrada y meter el gel de sílice.
3. Abrir la caseta y la bombona de N₂ y colocar el LTH en su toma. Abrir la llave de la toma (siempre con el LTH abierto) y comprobar que hay la presión necesaria.
4. Llenar el recipiente conectado a la bomba con agua destilada y comprobar que ésta funciona.

Ciemat	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 11 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

- Preparar todos los componentes de la celda y limpiarlos, comprobando las juntas tóricas. Preparar el resto de material necesario y los impresos.

Tras fabricar la pastilla se procede a su introducción en la celda siguiendo los pasos que se detallan a continuación:

- Saturar la piedra porosa de la celda con los conductos de hidratación. Colocar sobre ella la membrana bien ajustada. Con un papel limpio retirar el agua sobrante con mucho cuidado de no arrugar la membrana (si se utiliza papel de filtro, éste ha de colocarse antes que la membrana, siempre sin arrugas).
- Volver a pesar y medir la pastilla, anotar los datos en el impreso y colocarla sobre la membrana con una ligera presión.
- Cerrar la celda y enroscar en cruz.
- Colocar la manguera de presión y abrir la llave de entrada a la celda.
- Dar una pequeña presión a la celda y conectar las tomas de agua inmediatamente. Lentamente ir subiendo la presión hasta el valor deseado. Cerrar la llave de la celda.
- Liberar la presión del LTH, cerrar la toma de N₂ y desconectar la manguera. Cerrar la bombona de N₂.

4.3.2.2 Desecadores


El paso previo para el montaje inicial es la preparación de unos 850 cm³ de disolución de ácido sulfúrico de la densidad necesaria para que la actividad de agua generada imponga la succión deseada.

- Teniendo en cuenta la densidad de la disolución requerida y el volumen a preparar, se calculan los gramos de disolución correspondientes.
- Se comprueba en las tablas o con los correspondientes ajustes qué porcentaje en peso de sulfúrico es necesario para obtener esa densidad y, teniendo en cuenta este porcentaje y los gramos de disolución que se requiere preparar, se calcula el peso de sulfúrico puro necesario.
- El cálculo del peso de reactivo necesario se hace teniendo en cuenta la pureza del reactivo utilizado, que suele ser del 96 ó 98 %. La diferencia entre el peso total de disolución requerido y el peso de reactivo necesario, nos da el peso de agua destilada.

La disolución ha de prepararse el día anterior y almacenarse en la sala del ensayo a 20 °C.

Los pasos a seguir para el montaje inicial son:

- Encender la balanza, comprobar que está equilibrada y meter en ella un recipiente con gel de sílice.

	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 12 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

2. Preparar y referenciar cápsulas de vidrio o porcelana para cada una de las muestras, anotando su peso.
3. Colocar cada pastilla en su cápsula correspondiente (tara), anotar el peso del conjunto e introducir en el desecador. En cada desecador se pueden introducir hasta nueve pastillas, aunque hay que tener en cuenta que cuánto mayor sea el número de muestras introducidas en un mismo desecador, mayor será la variación de densidad de la disolución que se produzca durante el ensayo.
4. Cerrar el desecador y hacer el vacío, para que se genere la humedad relativa deseada en el interior del desecador de forma más rápida.

4.3.3 Desarrollo del ensayo: pesadas intermedias

4.3.3.1 Celdas de membrana

Semanalmente se comprueba la variación de humedad sufrida por la muestra, para lo que se desmonta la celda, se pesa la pastilla y se vuelve a introducir en la celda con la misma presión (la periodicidad de las pesadas puede variar en función de las necesidades del ensayo o de las características de las muestras):

Como preparación se repetirán los tres primeros puntos detallados en 0 y se llenará un recipiente con agua destilada. A continuación se seguirán los siguientes pasos:

1. Desconectar las tomas de agua de la celda.
2. Abrir la llave de la celda y bajar la presión lentamente.
3. Quitar tornillos y abrir la celda. Al abrir la celda cuidar que la membrana no esté pegada a la muestra y, si lo está, despegarla con la espátula.
4. Coger la muestra, pesarla y medirla rápidamente y anotar los datos en el impreso, junto con la fecha. La membrana y el papel de filtro se despegan de la celda y se mantienen durante esta operación en un recipiente con agua destilada.
5. Con el frasco lavador echar agua destilada en la piedra porosa. Colocar el papel de filtro y la membrana y secar superficialmente con papel limpio.
6. Repetir los 4 puntos finales de la sección 4.3.2.1.

4.3.3.2 Desecadores

Semanalmente se comprueba la variación de humedad sufrida por la muestra, para lo que se quita el vacío y se abre el desecador, se pesa la pastilla con su tara y se vuelve a introducir en el desecador

Ciemat	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 13 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

con la misma disolución (la periodicidad de las pesadas puede variar en función de las necesidades del ensayo o de las características de las muestras). Se seguirán los siguientes pasos:

1. Abrir la llave del desecador.
2. Pesar y medir la altura y el diámetro de cada muestra rápidamente y anotar en el impreso, junto con la fecha.
3. Volver a introducir todas las muestras en el mismo desecador y hacer el vacío.

4.3.4 Curva de retención


Para obtener la curva de retención, una vez estabilizada la humedad de la muestra para una succión determinada, se realizará una última pesada y se medirá la muestra, y después se volverá a introducir en la celda o desecador, siguiendo los pasos detallados en las secciones previas, con la diferencia de que en este caso se cambiará el porcentaje de ácido sulfúrico en la disolución, con el objeto de que la succión varíe en el sentido que se desee, según se esté siguiendo una trayectoria de secado (aumento de la succión) o de humectación (disminución de la succión). El procedimiento hasta estabilización de la humedad en la nueva succión es el mismo que se ha descrito en el apartado “Desarrollo del ensayo: pesadas intermedias”. Cuando el material se conoce y se tiene una idea aproximada del tiempo de estabilización, se pueden suprimir las pesadas intermedias y hacer una única pesada final transcurrido el tiempo estimado de equilibrio. De esta forma se evita manipular la muestra innecesariamente. En este último caso, será necesario corregir con frecuencia la presión de las celdas y el vacío de los desecadores, que tienden a disminuir con el tiempo.

4.3.5 Averías

La presión en la celda puede bajar súbitamente o no mantenerse constante por alguno de los motivos siguientes: por rotura de membrana, lo que se reconoce porque por las tomas de agua salen burbujas continuamente, por fallo de juntas tóricas, o por fuga por la llave de N₂. En el primer caso es necesario cambiar la membrana, que ha de preparase previamente según se explica en la sección 4.3.2.1. En los otros casos es necesario desmontar la celda para su reparación, siguiendo los pasos detallados en la misma sección. Si la celda ha permanecido sin presión durante varios días la muestra deberá desecharse.

4.3.6 Desmontaje

El proceso descrito en el apartado “Desarrollo del ensayo: pesadas intermedias” se repetirá semanalmente hasta que la oscilación semanal de humedad sea inferior al 1%. Entonces se realizará una última pesada de la muestra, se medirán el diámetro y la altura final de la muestra y se secará en estufa a 110°C durante 24 horas para obtener el peso seco (Norma UNE 103-300). Se comprobará así mismo mediante picnómetro la densidad final de la disolución de ácido sulfúrico. En el caso de que se esté determinando la curva de retención, el desmontaje se hará al alcanzarse el equilibrio en el último escalón de succión previsto.

	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 14 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

4.4 Cálculo de resultados

La humedad (w) después de cada pesada se calcula tomando como peso seco el teórico de la muestra (P seco teórico). De esta manera se van obteniendo los puntos de una curva que relaciona tiempo transcurrido con humedad para una succión dada:

$$w = \frac{\text{Peso intermedio} - \text{Peso seco teórico}}{\text{Peso seco teórico}} \times 100$$

La densidad seca final (ρ_d) se calcula dividiendo el peso seco teórico (P seco) (o el peso seco de estufa si no se ha perdido muestra) por el volumen final calculado a partir del diámetro (ϕ) y la altura (h) medidos.

$$\rho_d = \frac{P \text{ seco}}{\pi \times \left(\frac{\phi \text{ final}}{2}\right)^2 \times h \text{ final}}$$

Disponiendo de la humedad y densidad y conociendo el peso específico del material, se puede calcular el grado de saturación, y expresar los resultados obtenidos como relación succión/grado de saturación. La succión correspondiente a cada escalón se calcula a partir de la densidad de la disolución de ácido sulfúrico, según se explica en la sección 3.2.

Tanto en el caso de haber determinado puntos de la relación succión/humedad con diferentes muestras, como en el de haber determinado la curva de retención para una misma muestra, el resultado final será una curva que relaciona estos dos parámetros, en la que siempre se deben especificar las condiciones iniciales de la muestra y la trayectoria de succión seguida.

4.5 Almacenamiento de muestras


Una vez finalizado el proceso las muestras pueden desecharse.

4.6 Registro de resultados

Los resultados intermedios y finales, así como cualquier otro tipo de anotación de interés, deben ser registrados en los impresos y hojas de cálculo correspondientes (cf. impresos adjuntos).

4.7 Fecha de revisión

Este procedimiento se revisará en tres años a partir de la fecha de su aprobación.

	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN/HUMEDAD EN SUELOS	HOJA 15 DE 15
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-1		

5 RESPONSABLES

Los responsables del cumplimiento de este procedimiento y de la realización práctica de las tareas descritas en el mismo serán:

El Jefe de Laboratorio, Técnico Superior Licenciado en Ciencias. Responsable del cumplimiento global del procedimiento y de la gestión de las muestras del laboratorio.

El Analista Instrumentista, nivel de formación FPI rama laboratorio o equivalente. Responsable de la realización del proceso.

6 REFERENCIAS

ESCARIO, V. & SÁEZ, J.(1973): Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction. *Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils* 2: 195-200. Haifa.

ESTEBAN, F. & SÁEZ, J.(1988): A device to measure the swelling characteristics of rock samples with control of the suction up to very high values. *ISRM Symposium on Rock Mechanics and Power Plants* 2. Madrid.

GMITRO & VERMEULEN (1964): *An I. Ch. E. J.* 10(5):740.

LIDE, D.R.(1995): *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 75th ed. CRC Press. 15-22.

RICHARDS, L.A.(1941): A pressure membrane extraction apparatus for soil suction. *Soil Science* 51: 377-386.

Norma UNE 103-300: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

7 ANEXOS

- Formato PE-IA-CH-1.1: Determinación de la relación succión/humedad.
- Formato PE-IA-CH-1.2: Determinación de la relación succión/humedad (continuación).



PROYECTO.....


DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN-HUMEDAD (Procedimiento PE-IA-CH-1)

Referencia				
Muestra				
Densidad seca g/cm ³				
Humedad inicial %				
Volumen cm ³				
Peso seco teórico g				
Muestra pesada g				
Calibre	24481	24481	24481	24481
Balanza	19058	19058	19058	19058
Diámetro cm				
Superficie cm ²				
Altura cm				
Tara g				
T+S+A g				
S+A inicial g				
Fecha inicio				
Descripción ensayo				
Fecha				
Balanza/calibre	19058/24481	19058/24481	19058/24481	19058/24481
Celda/Desecador/% sulfúr				
Densidad disolución/presión				
T+S+A g				
Tara g				
Altura mm				
Diámetro mm				
Fecha				
Balanza/calibre	19058/24481	19058/24481	19058/24481	19058/24481
Celda/Desecador/% sulfúr				
Densidad disolución/presión				
T+S+A g				
Tara g				
Altura mm				
Diámetro mm				

DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN SUCCIÓN-HUMEDAD (continuación)				
Referencia				
Fecha				
Balanza/calibre	19058/24481	19058/24481	19058/24481	19058/24481
Celda/Desecador/% sulfúr				
Densidad disolución/presión				
T+S+A g				
Tara g				
Altura mm				
Diámetro mm				
Fecha				
Balanza/calibre	19058/24481	19058/24481	19058/24481	19058/24481
Celda/Desecador/% sulfúr				
Densidad disolución/presión				
T+S+A g				
Tara g				
Altura mm				
Diámetro mm				
Fecha				
Balanza/calibre	19058/24481	19058/24481	19058/24481	19058/24481
Celda/Desecador/% sulfúr				
Densidad disolución/presión				
T+S+A g				
Tara g				
Altura mm				
Diámetro mm				
Fecha				
Balanza/calibre	19058/24481	19058/24481	19058/24481	19058/24481
Celda/Desecador/% sulfúr				
Densidad disolución/presión				
T+S+A g				
Tara g				
Altura mm				
Diámetro mm				

ANEXO V

**PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN
DEL ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN
CONTROLADA**

	DEPARTAMENTO DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA ENERGÍA	HOJA 1 DE 20
	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE EMPLAZAMIENTOS	REVISIÓN 0
PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO: PE-IA-CH-2		

TITULO: ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA

COPIA CONTROLADA N°:

ASIGNADA A:

REDACTADO POR: (*)	María Victoria Villar Galicia
REVISADO POR: (*)	
CONFORMADO POR CALIDAD: (*)	
APROBADO POR: (*)	

(*) NOMBRE(S), FIRMA(S), FECHA(S)

Ciemat	ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 3 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

INDICE

1	OBJETO	4
2	ALCANCE	4
3	DEFINICIONES	4
3.1	Celdas de membrana.....	5
3.2	Celdas con depósito para disolución	5
4	DESCRIPCIÓN	6
4.1	Instrumentación y materiales.....	6
4.1.1	Material específico para el ensayo en celdas de membrana	8
4.1.2	Material específico para el ensayo en celdas con depósito.....	10
4.2	Condiciones de operación.....	11
4.3	Calibrado	11
4.4	Metodología.....	12
4.4.1	Preparación de la muestra.....	12
4.4.2	Montaje inicial	12
4.4.3	Desarrollo del ensayo	15
4.4.4	Averías.....	16
4.4.5	Desmontaje	16
4.5	Observaciones finales	18
4.6	Cálculo de resultados	18
4.7	Almacenamiento de muestras	19
4.8	Registro de resultados.....	19
4.9	Fecha de revisión	19
5	RESPONSABLES	19
6	REFERENCIAS	20
7	ANEXOS	20

Ciemat	ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 4 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

1 OBJETO

En esta Procedimiento se describe la metodología para el montaje y realización de un ensayo edométrico con control de la succión a 20 °C. El equipo utilizado depende del rango de succión considerado: para succiones entre 0,1 y 14 MPa se utilizan celdas de membrana, y para succiones superiores a 3 MPa, celdas con depósito para disolución de ácido sulfúrico.

2 ALCANCE

El presente procedimiento afecta al personal del Programa de Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos que precise realizar un “Ensayo edométrico con succión controlada” en la Instalación 630 “Laboratorio de Materiales Subsaturados”. El método es aplicable a suelos inalterados o remoldeados cuya saturación se produzca para succiones no inferiores a 0,1 MPa, y en los que el tamaño máximo de partícula no sea superior a la quinta parte de la altura de la probeta (2 mm).

3 DEFINICIONES

El ensayo edométrico permite estudiar la compresibilidad unidimensional de los suelos. Gracias a él se pueden determinar la velocidad y magnitud de la consolidación de un suelo confinado lateralmente cuando se le carga y drena axialmente. Y a la inversa, las características de su hinchamiento cuando es liberado de la carga.

Cuando se realizan ensayos edométricos con succión controlada se introduce una variable de estado más en el sistema de esfuerzos, la succión. Esto supone que la muestra, además de sufrir modificaciones en la tensión vertical, se somete a succiones diferentes durante el ensayo. Así, la succión se puede mantener constante mientras dura el proceso de carga de la muestra; o bien, ésta puede experimentar trayectorias de secado o humectación, por aumento o reducción de la succión, mientras la tensión vertical permanece constante.

Para imponer la succión se utilizan dos técnicas diferentes según el rango en que se trabaje: la traslación de ejes (celdas de membrana: Escario & Sáez 1973) y la imposición de una humedad relativa (celdas con depósito para disolución de ácido sulfúrico: Esteban & Sáez 1988). En ambos casos, la succión se impone, pero no se mide, puesto que no existen técnicas convencionales para medir succiones elevadas en materiales muy expansivos. El control de la succión (s) se realiza cambiando los valores de la presión de aire (u_a) o de la presión de agua (u_w) en los poros de la muestra, puesto que los cambios de succión vienen dados por la diferencia entre ambas ($s=u_a-u_w$).

Ciemat	ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 5 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

3.1 Celdas de membrana

El método está basado en el principio de traslación de ejes, que consiste en aumentar la succión mediante el aumento de presión en la fase gaseosa (Richards 1941, Hilf 1956). La muestra se coloca en una celda en contacto con agua a presión atmosférica a través de una membrana permeable al agua pero no al gas. Inmediatamente se aumenta la presión en la celda inyectando gas a la presión deseada, lo que aumenta la presión de aire en los poros de la muestra. Esta nueva situación fuerza a la muestra a intercambiar agua a través de la membrana hasta alcanzar de nuevo el equilibrio. Puesto que los cambios de succión vienen dados por la diferencia entre la presión de aire en los poros y la presión de agua, al aplicar una presión de aire a la muestra, se introduce un aumento de u_a , mientras que u_w permanece igual a la presión atmosférica. De esta manera, la succión varía la misma cantidad que la presión de gas. La membrana permite el paso de iones, por lo que mediante este método sólo es posible controlar la succión matricial, y no la osmótica. Debido a las limitaciones mecánicas de la celda, sólo es posible aplicar succiones menores de 14 MPa. Como gas se utiliza nitrógeno industrial.

3.2 Celdas con depósito para disolución

El método de imposición de una humedad relativa (HR) se basa en que ésta condiciona la presión de agua y gas en los poros (u_w y u_a). Esta humedad puede imponerse mediante disoluciones de ácido sulfúrico (aunque cualquier otra disolución de actividad de agua conocida podría utilizarse). La muestra intercambia agua con la atmósfera hasta que alcanza el equilibrio termodinámico con la presión de vapor de la disolución. La presión en los poros de la muestra (s , en MPa) se relaciona con la actividad de agua de la disolución ($a_w=HR/100$) mediante la ley de Kelvin:

$$s = -10^{-6} \frac{R \times T}{V_w} \ln\left(\frac{HR}{100}\right)$$

donde R es la constante universal de los gases (8,3143 J/mol·K), T la temperatura absoluta y V_w , el volumen molar del agua ($1,80 \cdot 10^{-5}$ m³/mol).

La relación entre la actividad de la disolución (a_w) y el porcentaje en peso de ácido sulfúrico utilizado para prepararla (p) se refleja en tablas experimentales (Gmitro & Vermeulen 1964). Esta relación depende de la temperatura, por lo que ésta ha de permanecer constante durante los ensayos. Para 20 °C la relación puede ajustarse a una ecuación polinómica de cuarto grado:

$$a_w = 7 \cdot 10^{-8} \times p^4 - 6 \cdot 10^{-6} \times p^3 - 0,0001 \times p^2 - 0,0019 \times p + 0,9927$$

La transferencia de agua entre la arcilla y la atmósfera puede hacer variar la densidad de la disolución, por lo que ésta ha de comprobarse antes y después de la estabilización, lo que se realiza con picnómetros. Existe una relación experimental entre el peso específico de la disolución (o densidad, d) y el porcentaje en peso de sulfúrico de la disolución (p , que a su vez depende de la

Ciemat	ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 6 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

actividad, a_w), dependiente de la temperatura (Lide 1995). Para 20 °C esta relación se ajusta a una ecuación exponencial:

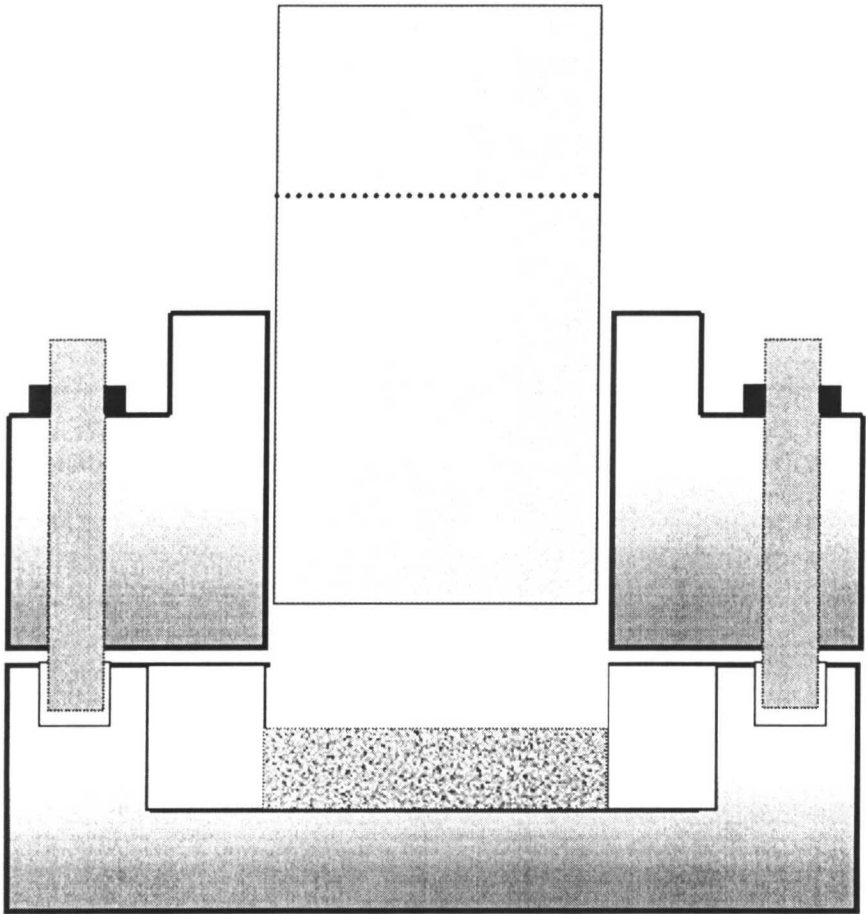
$$p = 145,9 \times \ln(d) + 0,9807$$

Con este método pueden obtenerse succiones entre 30 y 500 MPa.

4 DESCRIPCIÓN


4.1 Instrumentación y materiales

- **Prensa uniaxial o gato hidráulico.** Para fabricación de las pastillas.
- **Molde de compactación.** Consta de dos piezas unidas por tornillos y de un pistón marcado, fabricados en acero endurecido (Figura 1 y Figura 2). Permite el alojamiento del anillo portamuestras en su interior. El diámetro interno del anillo portamuestras puede ser de 3,81 ó 4,95 cm y la altura de 1,2 ó 2,4 cm.
- **Anillo cortador y su correspondiente extractor.** Para preparación de muestras inalteradas.
- **Pieza circular rígida.** Cuyo diámetro sea algo menor al del anillo portamuestras y su altura la mitad. Se utiliza para comprobar que la altura final de la pastilla fabricada es la deseada y para el tarado del equipo edométrico.
- **Balanza.** Con capacidad mínima de 1000 g y precisión $\pm 0,01$ g. Se utiliza para la preparación y desmontaje de la muestra, y para la preparación de las disoluciones de ácido sulfúrico.
- **Estufa.** Ha de mantener una temperatura entre 105 y 110°C.
- **Herramientas.** Llave Allen nº 8 para los tornillos del molde de compactación.
- **Varios.** Espátula, tijeras, cápsulas de porcelana, frasco lavador con agua destilada, recipiente con gel de sílice, calibre, grasa de vacío, embudo de plástico, papel de laboratorio, cuchillos y martillo de goma, para la extracción final de la muestra.
- **Bancada edométrica.** Permite el alojamiento de la celda en ella, y dispone de un sistema de palancas que posibilita la aplicación de cargas según una relación 1:10 ó 1:7,695, dependiendo del equipo.
- **Comparadores.** Con su acoplamiento a los vástagos de carga de las celdas. Han de apreciar milésima de milímetro.
- **Juego de pesas de plomo.**



 Anillo portamuestras  Pistón de ataque  Muestra

Figura 1: Sección esquemática del molde de compactación

	ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 8 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

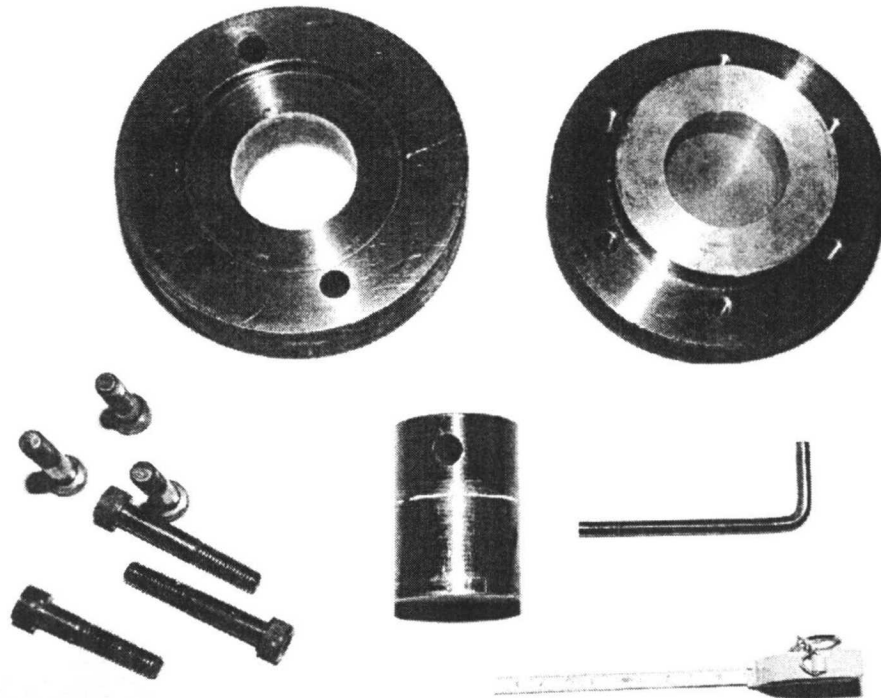


Figura 2: Molde de compactación para el ensayo edométrico en celdas de membrana

4.1.1 Material específico para el ensayo en celdas de membrana

- **Celda de membrana.** En acero inoxidable con base, tapa y cuerpo central (Figura 3). La parte inferior lleva encastrada una piedra porosa por debajo de la cual hay dos orificios para entrada y salida de agua. En el cuerpo de la celda se aloja el anillo portamuestra. La parte superior de la celda tiene un orificio central que permite el paso del vástago de carga. Éste apoya sobre el pistón de reparto de carga, que lleva pegada una piedra porosa en la parte inferior, que permanece directamente en contacto con la muestra. La tapa de la celda lleva también la entrada de gas con un manómetro acoplado para presiones de hasta 160 bar. Exteriormente, un comparador de deformación que aprecia milésima de milímetro, unido al vástago de carga, apoya sobre la tapa de la celda.

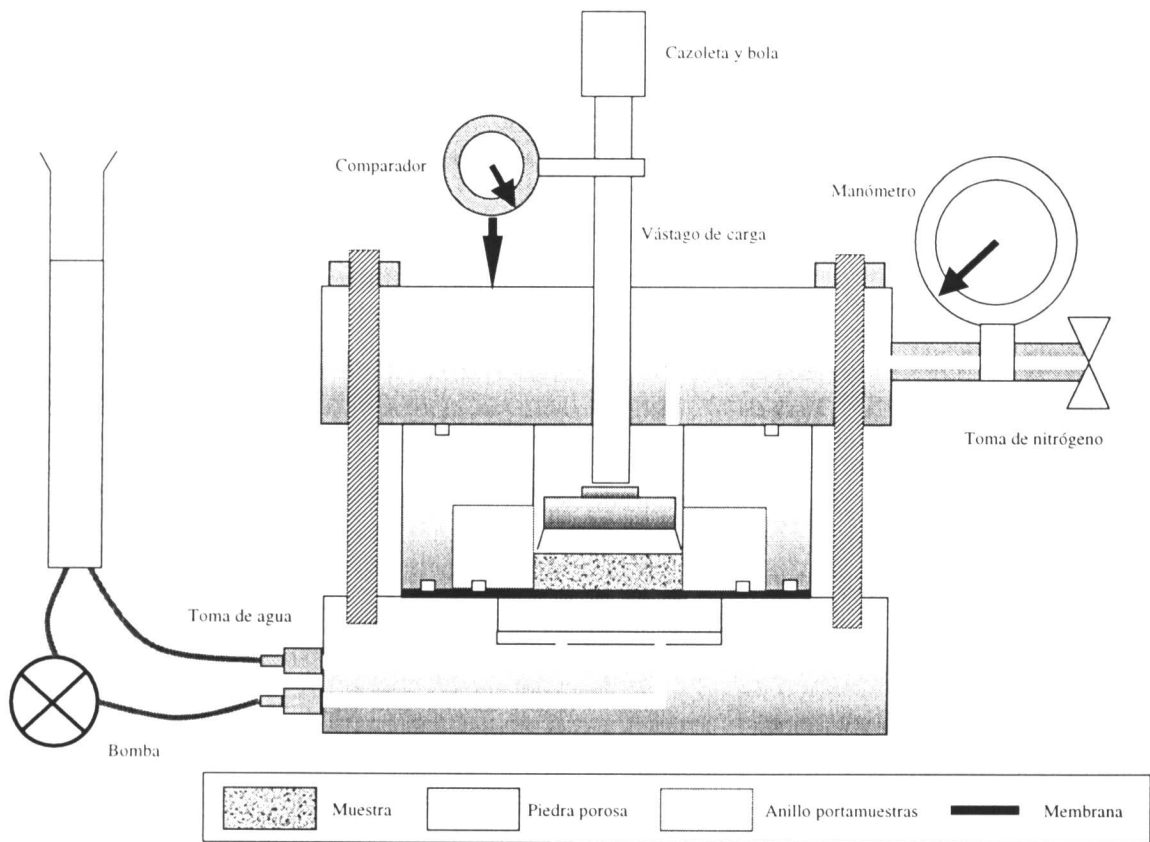



Figura 3: Sección esquemática de una celda de membrana para ensayo edométrico

- **Depósito de agua destilada conectado a bomba.** La bomba puede ser peristáltica o centrífuga, su función es la de renovar el agua en contacto con la membrana y hacer circular las burbujas de aire que puedan difundir a través de ella. El agua debe llevar añadido formaldehído al 2% para proteger la membrana de la proliferación de organismos.
- **Papel de filtro.** Whatman 54, recortado en forma de anillo, con un diámetro exterior igual al diámetro interno de la celda y un diámetro interno igual al de la muestra.
- **Membranas semipermeables** (tipo Visking de la casa Medicell Int. Ltd. o Spectra/Por de la casa Spectrum). Estas membranas, de celulosa regenerada, tienen una naturaleza amorfa de tipo gel, y un diámetro de poro de 2,4 nm, por lo que son flexibles y adecuadas para trabajos de filtración y ósmosis. Se han de utilizar previamente lavadas y reblandecidas, y recortadas según el diámetro de la base (11 cm), para lo que puede ser útil disponer de un disco de cobre recortado según estas dimensiones que sirva de plantilla.
- **Instalación de gas a alta presión.** Bombona de nitrógeno industrial de 200 bar instalada en caseta exterior. Línea de alta presión hasta el interior del laboratorio. LTH con salida y entrada reguladas hasta 200 bar y otro con salida regulada hasta 10 bar. Manguera de alta presión para conexión del LTH con la celda.

	ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 10 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

- **Herramientas.** Llave de vaso de 6 caras de 22 mm para los tornillos de la celda. Llave fija nº 19 y/o inglesa para conexiones de la manguera de alta presión.

4.1.2 Material específico para el ensayo en celdas con depósito

- **Celda con depósito** (Figura 4). Consta de base y tapa fabricadas en acero inoxidable de alta resistencia a la corrosión (AISI 316L), y de un cuerpo cilíndrico fabricado en material transparente (metacrílate) que posee un resalte interno sobre el que apoya un depósito de cristal en forma de anillo. Sobre la base de la celda apoya una piedra porosa, sobre ella el anillo portamuestras y finalmente el pistón solidario con la piedra porosa superior. Este conjunto se sujeta a la base de la celda mediante una brida de acero. La tapa superior presenta un orificio que permite el paso del vástago de carga, una perforación con tapón para la introducción del ácido sulfúrico y una entrada cerrada mediante llave para hacer el vacío. Exteriormente, un comparador que aprecia milésima de milímetro unido al vástago de carga, apoya sobre la tapa de la celda.

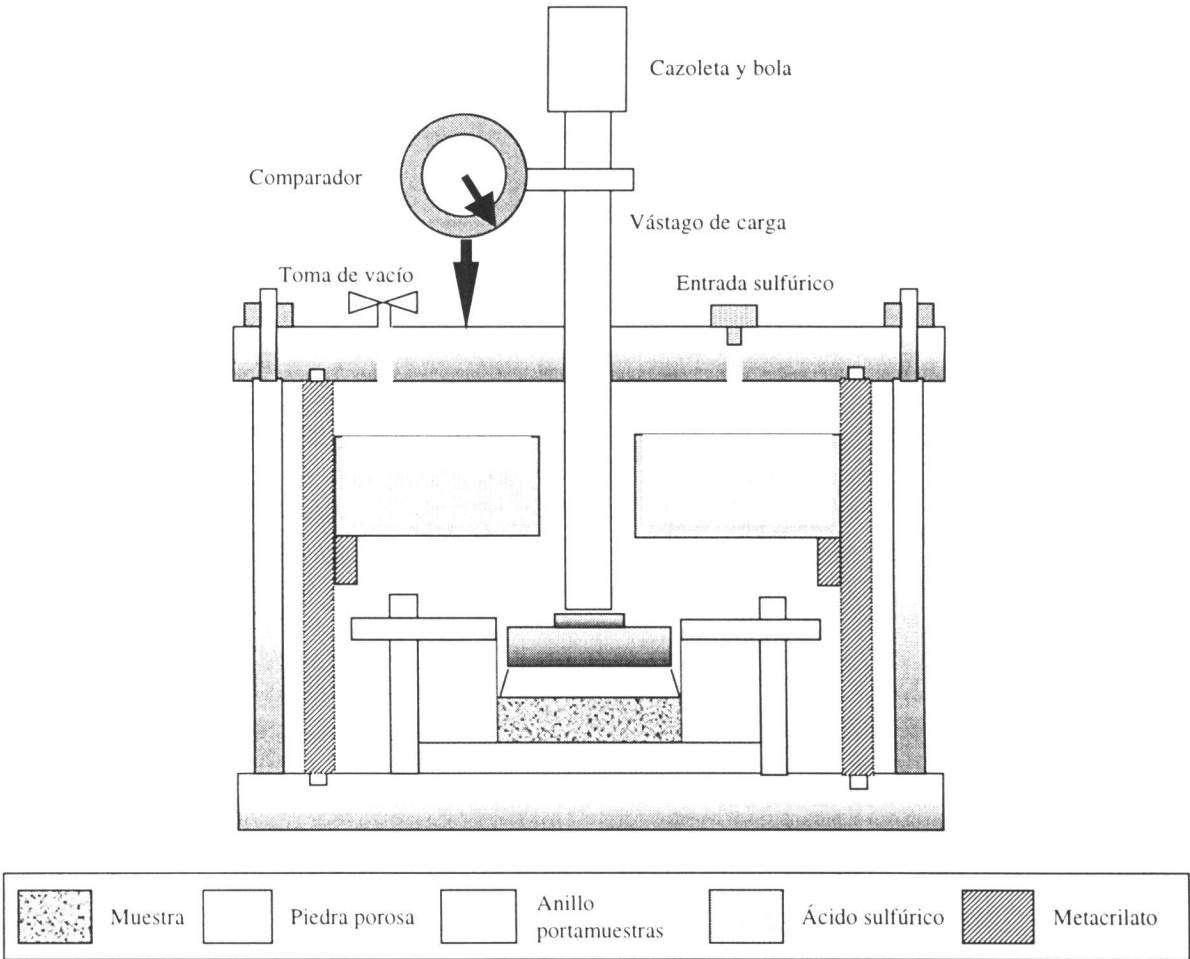



Figura 4: Sección esquemática de una celda edométrica con depósito para disolución

	ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 11 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

- **Vasos de precipitado, agua destilada y ácido sulfúrico** (al 96 ó 98 %). Para preparar las disoluciones.
- **Embudos y jeringuillas**, para la introducción y extracción de la disolución.
- **Picnómetros para líquidos**. Tarados y referenciados, para comprobar la densidad de las disoluciones.
- **Balanza**. Con capacidad mínima de 50 g y precisión $\pm 0,001$ g, para pesado de los picnómetros.
- **Bomba de vacío**.

4.2 Condiciones de operación


Las celdas y bancadas deben mantenerse en un recinto con temperatura controlada y regulada a 20 °C.

4.3 Calibrado

Se realizará un calibrado periódico de estufa, balanza y manómetros, así como del brazo de palanca de los edómetros. Para esto último se utilizará un anillo dinamométrico que permita determinar con precisión la presión aplicada en función de las pesas colocadas en el colgadero. Dada la larga duración de estos ensayos, conviene ajustar el brazo de palanca al finalizar cada uno de ellos.

El equipo edométrico puede sufrir cierta deformación instantánea al aplicarse la carga y al descargar. Esta deformación debe medirse cuidadosamente para poder discernir en cada momento qué parte de la deformación medida corresponde efectivamente a la muestra y cuál ha de sustraerse por corresponder al aparato. La forma de hacerlo es calibrar el equipo utilizando una pastilla, de la misma altura que la muestra con que se trabaja habitualmente y de diámetro 1 mm menor, no deformable bajo las cargas aplicadas, de acero, que se coloca en el lugar de la muestra. El tarado ha de hacerse también incluyendo el papel de filtro o la membrana y saturándolos con agua destilada, tal y como se hace en el ensayo con muestra (ASTM D2435). A continuación se procede a la carga escalonada del equipo y posteriormente a su descarga. Se registra la deformación en cada escalón de carga, con el fin de obtener una curva que relacione carga con deformación en todo el intervalo de cargas aplicables. Se ha de obtener una curva para la rama de carga y otra para la rama de descarga, ya que suelen presentar histéresis, especialmente si se utiliza papel de filtro o membrana. La deformación del equipo ha de irse corrigiendo de la lectura registrada a medida que se aplican las cargas.

Hay que señalar que el calibrado del equipo no es exactamente repetitivo, incluso aunque se lleve a cabo en las mismas condiciones, por lo que ha de realizarse varias veces con el fin de obtener valores medios.

	ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 12 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

4.4 Metodología

4.4.1 Preparación de la muestra

Antes de preparar la muestra ha de pesarse el anillo portamuestras y comprobar sus diámetro interno y altura, datos que se anotarán en el impreso correspondiente.

En el caso de muestras inalteradas será necesario adecuarlas al diámetro de los anillos del edómetro tallándolas con el anillo cortador conveniente, procurando no modificar ni su humedad ni su densidad. Una vez tallada la pastilla, se pasa con ayuda de un extractor al anillo portamuestras, se comprueba su altura final y peso y se anotan.

Para muestras remoldeadas se prepara una pastilla de la densidad y humedad requeridas, compactándola directamente en el interior del anillo del edómetro:

1. Se calcula el peso de muestra necesario para fabricar la pastilla con la densidad y humedad deseadas, teniendo en cuenta el volumen final esperado.
2. Se toma una muestra representativa y se pesa la cantidad necesaria.
3. Se acopla el anillo portamuestras del edómetro en el molde y se introduce en él la muestra, con ayuda de un embudo si es necesario, y se compacta en la prensa uniaxial o con un gato hidráulico, anotando la carga aplicada.
4. Se desmonta el molde de compactación, se extrae el anillo portamuestras y se comprueba que la pastilla obtenida tiene la altura deseada con ayuda de una pastilla de bronce (u otro material rígido) de la altura apropiada. Se anota el peso del conjunto del anillo y la muestra y se guarda en bolsa de plástico cerrada hasta su montaje en la celda, que ha de ser lo más rápido posible.

4.4.2 Montaje inicial

Se definirá si se va a comenzar con la muestra en estado seco, saturado, o con su humedad natural, y la trayectoria a seguir, que depende de las condiciones del terreno que se quieran reproducir y del tipo de conocimiento que se quiera obtener del material. Así mismo, se determinan con antelación los valores de succión y carga que se van a aplicar (escalones), cuyo número dependerá del detalle con que se requiera definir la curva y de las características de la muestra. Se definen los valores iniciales de presión vertical y succión, calculando las cargas necesarias a aplicar. La tensión vertical se obtiene mediante la aplicación de pesas de plomo en el colgadero. La relación entre pesas y presión es función del brazo de palanca del edómetro y de la sección de la muestra:

$$\text{carga vertical} = \frac{\text{presión vertical} \times \text{brazo palanca}}{\text{sección muestra}}$$

Ciemat	ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 13 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		


4.4.2.1 Celdas de membrana

Como pasos previos al montaje, se preparará el material y los equipos necesarios:

- Lavar un cuadrado de membrana en agua corriente durante 3 ó 4 horas. Unos minutos antes del montaje lavarla con agua destilada, cortarla a la medida del disco de cobre y volverla a dejar en agua destilada.
- Abrir la bombona de N₂ y colocar el LTH en su toma. Abrir la llave de la toma (siempre con el LTH abierto) y comprobar que hay la presión necesaria.
- Llenar el recipiente conectado a la bomba con agua destilada y comprobar que ésta funciona. Añadir una pequeña cantidad de formaldehído al 2 %, para evitar que se produzca la proliferación de microorganismos que pudieran dañar la membrana.
- Preparar todos los componentes de la celda y limpiarlos, comprobando las juntas tóricas. Aplicar grasa de vacío al vástago de carga. Cortar un anillo de papel de filtro de diámetro externo igual al de la celda e interno igual al de la muestra. Preparar el resto de material necesario y los impresos.

Una vez preparada la pastilla, se procede a su introducción en la celda siguiendo los pasos que se detallan a continuación:

1. Saturar la piedra porosa de la celda con los conductos de hidratación. Colocar sobre ella el papel de filtro previamente empapado en agua destilada y sobre él la membrana bien ajustada. Con un papel limpio retirar el agua sobrante con mucho cuidado de no arrugar la membrana.
2. Colocar el anillo portamuestras en el cuerpo de la celda y ambos sobre la piedra porosa, cuidando que las juntas tóricas queden en su alojamiento. Colocar sobre la muestra el pistón superior seco, poner la tapa con el vástago de carga untado de grasa de vacío en el final de su recorrido, cerrar la celda y enroscar en cruz.
3. Fijar el comparador al vástago y colocar sobre el vástago la cazoleta con la bola de transmisión de carga. Colocar la celda en su alojamiento.
4. Con una pesa de 250 g en el colgadero, que ocasione una pequeña presión de ajuste, ajustar el comparador a una lectura exacta e intermedia (5000).
5. Colocar la manguera de presión y abrir la llave de entrada a la celda.
6. Colocar la carga de compensación correspondiente y dar una pequeña presión a la celda. Conectar las tomas de agua. Lentamente ir subiendo la presión hasta el valor deseado, precediendo cada aumento de presión de nitrógeno por la carga de compensación necesaria. Una vez alcanzada la presión deseada, cerrar la entrada de gas a la celda y anotar la lectura del comparador. La carga de compensación es necesaria para evitar el

	ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 14 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

desplazamiento del vástago de carga ocasionado por la presión de nitrógeno en el interior de la celda. Su valor es función de la sección del vástago de carga, y se calcula según la expresión:

$$\text{carga compensación} = \frac{\text{presión celda} \times \text{sección vástago}}{\text{brazo palanca}}$$

7. Aplicar la carga deseada y comenzar a tomar lecturas de las deformaciones registradas por el comparador siguiendo una secuencia de tiempos creciente (10", 15", 20", 30", 45", 1', 2', 3', 5', 7', 10', 15', 20', 30', 45', 1 h, 2 h, 3 h, 5 h, 7 h, 10 h, 24 h y días sucesivos).

Finalmente, liberar la presión del LTH, cerrar la toma de N₂ y desconectar la manguera. Cerrar la bombona de N₂.

4.4.2.2 Celdas con depósito para disolución

El paso previo para el montaje inicial es la preparación de unos 250 cm³ de disolución de ácido sulfúrico de la densidad necesaria para que la actividad de agua generada imponga la succión deseada:

1. Teniendo en cuenta la densidad de la disolución requerida y el volumen a preparar, se calculan los gramos de disolución correspondientes.
2. Se comprueba en las tablas o con el ajuste correspondiente qué porcentaje en peso de sulfúrico es necesario para obtener esa densidad y, teniendo en cuenta este porcentaje y los gramos de disolución que se requiere preparar, se calcula el peso de sulfúrico puro necesario.
3. El cálculo del peso de reactivo necesario se hace teniendo en cuenta la pureza del reactivo utilizado, que suele ser del 96 ó 98 %. La diferencia entre el peso total de disolución requerido y el peso de reactivo necesario, nos da el peso de agua destilada a añadir.

La disolución ha de prepararse el día anterior y almacenarse en la sala del ensayo a 20 °C. Se ha de tener la precaución de verter el ácido sulfúrico sobre el agua, y nunca al revés, para evitar la ebullición de la disolución.

Los pasos a seguir para el montaje inicial son:

1. Colocar en su alojamiento la piedra porosa inferior seca, el papel de filtro y el anillo portamuestras. Ajustar el conjunto con el anillo de fijación. Colocar el pistón superior con la piedra porosa seca.
2. Montar el depósito de vidrio y el cuerpo de la celda, cuidando que las juntas tóricas queden en su alojamiento.

3. Poner la tapa de la celda con el vástago de carga al final de su recorrido untado de grasa de vacío y cerrarla. Fijar el comparador al vástago, colocar sobre la el vástago la cazoleta con la bola de transmisión de carga.
4. Colocar la celda en su alojamiento y fijarla mediante una pesa de 250 g en el colgadero.
5. Utilizando un embudo, echar 150 cm³ de disolución en el depósito de vidrio. Poner el tapón.
6. Hacer el vacío suavemente a través de la toma correspondiente, evitando que la disolución burbujee.
7. Repasar los tornillos de apriete de la celda y ajustar el comparador a una lectura exacta e intermedia (5000).
8. Aplicar al colgadero el peso correspondiente a la presión vertical deseada. Comenzar a tomar lecturas de la deformación siguiendo una secuencia de tiempos creciente.

Finalmente, comprobar la densidad de la disolución utilizada mediante picnómetro.

4.4.3 Desarrollo del ensayo


Diariamente se anota la deformación registrada por el comparador. Periódicamente es necesario corregir la presión de las celdas de membrana y el vacío de las celdas con depósito. Se comprueba también el nivel de los depósitos de agua conectados a las celdas de membrana.

Cuando el ensayo requiere mantener una deformación constante (es decir, la aplicación de cargas de manera que la lectura del comparador no varíe), se anotará cada episodio de carga, con el peso exacto aplicado y la variación sufrida por la lectura del comparador.

Una vez estabilizada la deformación para las condiciones de carga y succión correspondientes al escalón inicial, se procede al cambio de escalón. En materiales muy expansivos el tiempo requerido para estabilización puede ser muy largo, por lo que una vez definido el tiempo necesario para que se produzca la mayor parte de la deformación, se puede fijar la duración de cada escalón, que puede ser de unos 20 días para materiales muy expansivos.

Cuando el cambio de escalón suponga modificación de succión y de carga, la secuencia a seguir será realizar primero el cambio de succión y después el de carga.

En las celdas con presión de nitrógeno, el cambio de presión ha de realizarse lentamente y precedido de la modificación correspondiente de carga de compensación: cuando se vaya a aumentar la succión, es decir, la presión de nitrógeno, se colocará previamente la carga de compensación correspondiente al incremento de presión; y a la inversa, cuando haya de reducirse la presión de nitrógeno, la carga de compensación sólo se quitará una vez alcanzado el nuevo valor de presión. La deformación registrada por el comparador durante la operación de cambio de presión de nitrógeno se considera propia del aparato, y no atribuible a la muestra, ya que los efectos de la modificación de succión no se manifiestan sobre la muestra de forma inmediata. Tras realizar el

	ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 16 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

cambio de presión se realiza la modificación de carga vertical, e inmediatamente se comienza la secuencia de lecturas.

Para realizar el cambio de escalón en las celdas con depósito, se extrae la disolución mediante una jeringuilla a través del orificio en la tapa de la celda, y se introduce la nueva disolución con ayuda de un embudo de cristal. Una vez cerrado se vuelve a hacer el vacío, se aprietan los cierres de la tapa y se ajusta la lectura del comparador a la última lectura del escalón anterior. Si se precisa hacer también un cambio de carga vertical, se realizará la modificación de la carga en este momento. Inmediatamente se inicia la secuencia de lecturas. Se comprueba la densidad de las disoluciones extraída e introducida.

4.4.4 Averías

En los edómetros con succión controlada mediante presión de nitrógeno, la presión en la celda puede bajar súbitamente o no mantenerse constante por alguno de los motivos siguientes: por rotura de membrana, lo que se reconoce porque por las tomas de agua salen burbujas continuamente, por fallo de juntas tóricas o por fuga a través del vástago de carga o de la llave de entrada del nitrógeno. En los tres últimos casos la fuga se localiza utilizando un producto antifugas o simplemente agua jabonosa aplicada en las zonas sospechosas. Si es necesario cambiar la membrana, ésta ha de prepararse según se explica en la sección 4.4.2.1. En todos los casos es necesario desmontar la celda para su reparación o correcto montaje, siguiendo los pasos detallados previamente. Una vez montada la celda y colocada en su alojamiento, se procede a aplicarle toda la carga vertical que tenía y se incrementa la presión de nitrógeno hasta el valor propio del escalón. La lectura del comparador se ajusta al valor que tenía antes de producirse la fuga. Transcurridas unas horas, durante las cuales la muestra alcanza de nuevo el equilibrio perdido durante la fuga y el desmontaje, la lectura se vuelve a ajustar al valor anterior a la avería y se deja que siga su curso normal.


Si la presión de la celda ha permanecido baja durante dos o tres días, es preferible, una vez montada la celda en el edómetro y aplicada la carga vertical, aplicar una presión igual a la que tenía justo antes del desmontaje, que, como consecuencia de la fuga, será inferior al valor que debería tener. La lectura del comparador se ajusta al valor que tenía antes del desmontaje. Transcurridas unas horas, durante las cuales la muestra alcanza el equilibrio en esta situación, se incrementa la presión de nitrógeno hasta el valor propio del escalón y se deja que siga su curso normal.

Si la celda ha permanecido sin presión durante varios días o se han producido averías sucesivas, la muestra deberá desecharse.

Dada la larga duración de estos ensayos, que puede ser de varios meses, se ha observado en ocasiones que el comparador queda atascado; ha de comprobarse que esto no sucede, especialmente si dejan de registrarse deformaciones de manera inesperada.

4.4.5 Desmontaje

Una vez alcanzado el equilibrio del último escalón del ensayo, se procede a su desmontaje.

	ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 17 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

En el caso de las celdas de nitrógeno, se desconectan las tomas de agua, se libera la presión de la celda y se quitan todas las pesas del colgadero. Se toma la celda y sobre la mesa de trabajo se quita el comparador, se aflojan los tornillos para levantar la tapa y el cuerpo de la celda, y se extrae el conjunto formado por el pistón con la piedra porosa, el anillo portamuestras y la membrana en contacto con la parte inferior de la muestra. Si no se puede realizar la pesada inmediatamente, se guardará en bolsa de plástico para evitar que pierda humedad.

Para desmontar las celdas con depósito, se libera el vacío de la celda, se extrae la disolución con ayuda de una jeringuilla, se quitan las pesas del colgadero y se lleva la celda a la mesa de trabajo. Se aflojan los tornillos que permiten quitar la tapa y el cuerpo de la celda con el depósito. Se desatornilla la brida de fijación para poder extraer el conjunto formado por pistón con piedra porosa, anillo portamuestras y papel de filtro inferior, que se mantienen en bolsa de plástico cerrada hasta que se realice la pesada.

Es necesario conocer con la mayor precisión posible tanto la altura como el peso final de la muestra. La altura puede variar fácilmente durante el proceso de desmontaje, sobre todo si ha habido una liberación grande de carga. Para evitar al máximo la discrepancia entre la altura real de la muestra al final del ensayo edométrico y la altura medida una vez extraída de la celda, en cuanto el conjunto formado por el anillo, la muestra y la piedra porosa se extrae de la celda, se mide la altura del pistón solidario a la piedra porosa superior que sobresale con respecto al anillo portamuestras (h_s). Conociendo la altura del pistón (h_p) y la altura del anillo portamuestras (h_a), se puede determinar fácilmente la altura de la muestra antes de extraerla del anillo (Figura 5):

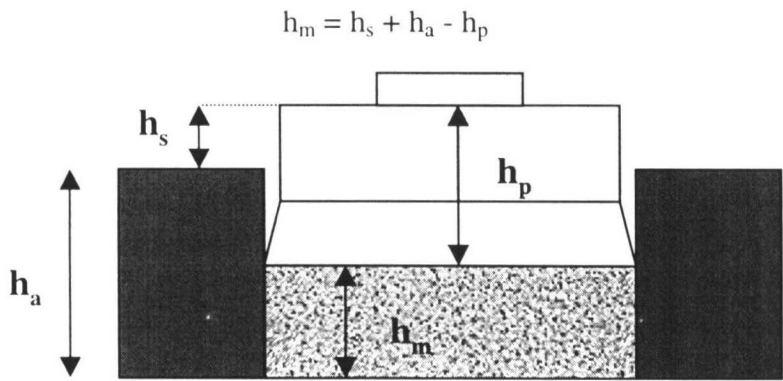



Figura 5: Medidas tomadas después de desmontar el anillo portamuestras del edómetro

Así mismo, durante el desmontaje se produce una pérdida de peso de muestra que queda adherida a las paredes del anillo, piedra porosa y papel de filtro. Con el fin de que el peso final medido coincida efectivamente con el peso de la muestra, y poder así calcular con exactitud su densidad seca, se pesa inicialmente el conjunto formado por el anillo portamuestras, la muestra, el papel de filtro inferior (o membrana) y el pistón superior. Después se extrae la muestra del anillo y se pesan todos los componentes, limpios de restos de muestra, por separado. La diferencia entre el peso inicial del conjunto y la de todos los componentes da el peso final de la muestra (P_f). La muestra pesada y medida, o parte de ella, se seca en estufa a 110 °C para determinar su humedad final (w_f)(Norma UNE 103-300). En general se utilizará la totalidad de la muestra para determinar la humedad, excepto si se requiere muestra para algún tipo de determinación específica (porosimetría,

	ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 18 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

geoquímica). En este último caso, se partirá la muestra, y la parte que no se utilice para determinar la humedad, se envolverá en papel parafinado para preservar su humedad, convenientemente rotulada.

Todos los datos han de anotarse en el impreso correspondiente.

4.5 Observaciones finales

- En el caso de ensayos en celda con depósito, se comprueba la densidad final de la disolución.
- La celda del edómetro se guardará limpia y seca en su alojamiento.
- Las piedras porosas se meten en agua durante unas horas para que se limpien de partículas arcillosas. Después se limpiarán en el baño de ultrasonidos, para lo que se introducen en un vaso de precipitados con agua destilada dentro del baño y se ultrasonan de 2 a 5 minutos. Se cambia el agua destilada del vaso de precipitados y se repite el proceso. Una vez limpias y secas al aire se mantienen en desecador.

4.6 Cálculo de resultados

En el impreso correspondiente al ensayo se realizan los siguientes cálculos:

1. A partir del peso final de muestra (Pf) y de la humedad final determinada (wf) se calcula el peso seco (Ps).


$$Ps = \frac{Pf}{1 + \frac{wf}{100}}$$

2. A partir del peso seco determinado se comprueban la densidad y humedad iniciales.
3. La densidad seca final (ρ_d) se calcula dividiendo el peso seco por el volumen final calculado a partir del diámetro (ϕ) y la altura (h) medidos.

$$\rho_d = \frac{P \text{ seco}}{\pi \times \left(\frac{\phi \text{ final}}{2}\right)^2 \times h \text{ final}}$$

En la hoja de cálculo correspondiente al ensayo se determina, para cada lectura tomada a diferentes tiempos:

1. La equivalencia entre lectura del comparador y altura de la muestra, teniendo en cuenta la lectura inicial del comparador, su apreciación y la altura inicial de la pastilla. Una vez conocida

	ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 19 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

la altura de la muestra en cada momento se puede calcular su densidad seca, y a partir de ésta y del peso específico del material se calcula su índice de poros.

- La deformación en cada momento (ϵ_t) se calcula como la relación entre la variación de altura experimentada por la muestra (diferencia entre altura inicial y altura en cada momento, Δh) y la altura inicial (h_i), expresada en tanto por ciento, considerándose de signo negativo los aumentos de altura.

$$\epsilon_t = \frac{\Delta h}{h_i} = \frac{h_i - h_t}{h_i}$$

Los resultados de cada escalón pueden presentarse como una gráfica semilogarítmica de la evolución del porcentaje de deformación o del índice de poros en función del tiempo (curvas de consolidación o hinchamiento).

Los resultados del conjunto del ensayo pueden presentarse en una gráfica semilogarítmica que relacione el índice de poros final de cada escalón con la carga vertical o succión correspondientes (curva edométrica). En el caso de los ensayos en celda con depósito, la succión correspondiente a cada escalón se calcula a partir de la densidad de la disolución de ácido sulfúrico, según se explica en la sección 3.2.

4.7 Almacenamiento de muestras

Una vez finalizado el proceso, parte de las muestras puede utilizarse para otras determinaciones, como porosimetría o mineralogía. El resto de la muestra, que se introdujo en estufa para calcular la humedad final, puede desecharse.

4.8 Registro de resultados


Los resultados intermedios y finales, así como cualquier otro tipo de anotación de interés, deben ser registrados en los impresos y hojas de cálculo correspondientes (cf. impresos adjuntos).

4.9 Fecha de revisión

Este procedimiento se revisará en tres años a partir de la fecha de su aprobación.

5 RESPONSABLES

Los responsables del cumplimiento de este procedimiento y de la realización práctica de las tareas descritas en el mismo serán:

	ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA	HOJA 20 DE 20
		REVISIÓN 0
PE-IA-CH-2		

El Jefe de Laboratorio, Técnico Superior Licenciado en Ciencias. Responsable del cumplimiento global del procedimiento y de la elaboración de resultados.

El Analista Instrumentista, nivel de formación FP II rama laboratorio o equivalente. Responsable de la realización del proceso.

6 REFERENCIAS

ASTM D2435 (1980): Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Soils. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones, Sect. 4, ASTM, Philadelphia, PA.

ESCARIO, V. & SÁEZ, J.(1973): Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction. *Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils* 2: 195-200. Haifa.

ESTEBAN, F. & SÁEZ, J.(1988): A device to measure the swelling characteristics of rock samples with control of the suction up to very high values. *ISRM Symposium on Rock Mechanics and Power Plants* 2. Madrid.

GMITRO & VERMEULEN (1964): An I. Ch. E. J. 10(5):740.

HILF, J.W.(1956): An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils. *US Bureau of Reclamation Tech. Memo.* 654. Denver.

LIDE, D.R.(1995): CRC Handbook of Chemistry and Physics. 75th ed. CRC Press. 15-22.

RICHARDS, L.A.(1941): A pressure membrane extraction apparatus for soil suction. *Soil Science* 51: 377-386.

Norma UNE 103-300: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

7 ANEXOS

Formato PE-IA-CH-2.1: Ensayo edométrico con succión controlada.

Formato PE-IA-CH-2.2: Lecturas del ensayo edométrico con succión controlada.



PROYECTO.....

ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA (Procedimiento PE-IA-CH-2)

REFERENCIA.....

Muestra		Humedad		%
Edómetro		Brazo palanca		
Diámetro	cm	Superficie		cm ²
Altura	cm	Volumen		cm ³
Densidad	g/cm ³	Peso seco teórico		g
Muestra pesada	g	Peso anillo		g
Anillo+muestra	g	Dispositivo/P comp.		
Balanza ref.	09218	Fecha		Agua

MONTAJE EN EDÓMETRO					
Escalón	Presión v. kg/cm ²	Succión kg/cm ²	Pesas kg	Fecha	Sulfúrico
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					

DESMONTAJE					
Fecha		Balanza	09218	Calibre	24481
Altura que sobresale (4)				Altura pistón	mm
Anill+Pist+Membr+Muestra		g	Altura pastilla		mm
Membrana		g	Peso muestra		g
Pistón		g	Peso muestra (calculado)		g
Anillo		g	Altura pastilla (calculada)		cm
HUMEDAD FINAL		Balanza ref.	09218	Estufa	23410
Tara	g	T+S+A	g	Suelo	g
T+S	g	Agua	g	Humedad final	%

CÁLCULOS			
Peso seco	g	Densidad inicial	g/cm ³
Humedad inicial	%	Densidad final	g/cm ³

LECTURAS DEL ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA (Procedimiento PE-IA-CH-2)

Referencia		Muestra		Hoja nº	
------------	--	---------	--	---------	--

[illegible]

ANEXO VI

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS POROSIMÉTRICOS EN MUESTRAS DE BLOQUES

MUESTREO BLOQUES MAQUETA. POROSIDAD. 1/2

BLOQUE	Posición	ρ_d (g/cm ³)	ϵ_1	ϵ_2	% total	Diámetro medio (μm)	grandes %	Moda (μm) grandes
c7p46s42 Tipo B	S-2	1,74	0,552	0,176	32	0,04	24	7,8
	M-2	1,73	0,561	0,158	28	0,02	18	10,0
	I-2			0,189		0,02	23	26,8
c8p31s91 Tipo B	S-2	1,74	0,552	0,253	46	0,01	22	12,8
	M-2	1,73	0,561	0,148	26	0,04	38	10,0
	I-2	1,72	0,569	0,176	31	0,01	23	10,0
c9p44s91 Tipo B	S-2	1,72	0,616	0,225	36	0,02	17	13,0
	M-2	1,71	0,626	0,304	48	0,01	14	3,0
	I-2			0,123		0,01	14	13,0
c10p31s98 Tipo B	S-2	1,73	0,561	0,176	31	0,02	18	6,1
	M-2	1,72	0,569	0,196	34	0,02	28	7,8
	I-2	1,72	0,570	0,188	33	0,04	30	7,8
c11p45s98 Tipo B	S-2	1,73	0,560	0,215	38	0,01	25	7,8
	M-2	1,82	0,483	0,176	36	0,01	22	7,8
	I-2	1,72	0,569	0,500	87	0,01	26	12,8
c18p44s48 Tipo A	S-2	1,73	0,970	0,167	17	0,02	27	4,8
	M-2	1,67	0,617	0,193	31	0,01	22	10,0
	I-2	1,69	0,598	0,174	29	0,01	21	10,0
c23p33s95 Tipo A	S-2	1,71	0,579	0,193	33	0,02	24	7,8
	M-2	1,72	0,570	0,188	33	0,01	25	3,7
	I-2	1,05	1,571	0,167	10	0,02	28	6,1
c28p23s39 Tipo A	S-2	1,72	0,570	0,117	20	0,10	39	6,1
	M-2	1,71	0,579	0,114	20	0,08	32	6,1
	I-2	1,70	0,588	0,177	30	0,01	24	6,1
c34p13s53 Tipo A	S-2							
	M-2	1,74	0,552	0,180	33	0,01	23	12,8
	I-2	1,74	0,552	0,177	32	0,02	27	6,1
c35p43s33 Tipo A	S-2	1,72	0,569	0,179	31	0,01	16	10,0
	M-2	1,72	0,569	0,165	28	0,01	18	10,0
	I-2	1,72	0,569	0,230	40	0,01	26	3,7
c36p35s33 Tipo A	S-2	1,72	0,552	0,221	40	0,02	18	9,0
	M-2	1,72	0,570	0,238	42	0,02	22	19,1
	I-2	1,72	0,570	0,167	29	0,06	29	7,8
c37p26s33 Tipo A	S-2	1,72	0,570	0,146	26	0,03	34	10,0
	M-2	1,71	0,579	0,134	23	0,02	26	10,0
	I-2	1,74	0,551	0,135	24	0,01	22	6,1
c40p34s100 Tipo A	S-2	1,72	0,570	0,357	63	0,06	33	7,8
	M-2	1,69	0,598	0,193	32	0,04	27	10,0
	I-2	1,71	0,579	0,159	27	0,04	15	6,1
cc1p43s100 Tipo D	S-2	1,76	0,534	0,157	29	0,01	16	7,8
	M-2	1,72	0,570	0,157	27	0,01	17	7,8
	I-2	1,78	0,517	0,163	31	0,01	18	10,0
sin referencia Tipo D	S-2	1,75	0,543	0,233	43	0,01	20	10,0
	M-2	1,75	0,543	0,204	37	0,01	14	10,0
	I-2	1,78	0,517	0,170	33	0,01	23	21,0

e_1 : índice de poros por desplazamiento de mercurio; e_2 : índice de poros por intrusión de mercurio

% total: porcentaje del total de poros intruido por mercurio

poros grandes: $>6 \mu\text{m}$; medios: de 6 a $0,2 \mu\text{m}$; pequeños: entre $0,2$ y $0,006 \mu\text{m}$

coeficiente de uniformidad: $\text{diámetro}_{40}/\text{diámetro}_{80}$

MUESTREO BLOQUES MAQUETA. POROSIDAD. 2/2						
BLOQUE	Posición	medios %	Moda (µm) medios	pequeños %	Moda (µm) pequeños	coeficiente uniformidad
c7p46s42 Tipo B	S-2	21	0,32	55	0,008	40
	M-2	16	0,32	68	0,010	12
	I-2	10	0,25	67	0,008	6
c8p31s91 Tipo B	S-2	19	0,25	59	0,005	40
	M-2	27	0,52	34	0,008	136
	I-2	19	0,32	58	0,005	51
c9p44s91 Tipo B	S-2	30	0,30	53	0,010	19
	M-2	32	0,30	58	0,010	24
	I-2	28	0,30	58	0,010	9
c10p31s98 Tipo B	S-2	16	0,32	66	0,006	15
	M-2	17	0,32	55	0,008	51
	I-2	16	0,25	54	0,010	51
c11p45s98 Tipo B	S-2	19	1,40	56	0,006	31
	M-2	17	0,32	61	0,006	24
	I-2	22	0,32	52	0,008	1
c18p44s48 Tipo A	S-2	16	0,32	57	0,008	51
	M-2	23	1,40	55	0,008	51
	I-2	21	0,32	58	0,008	31
c23p33s95 Tipo A	S-2	23	0,32	53	0,008	65
	M-2	20	0,32	55	0,006	65
	I-2	30	0,32	42	0,008	106
c28p23s39 Tipo A	S-2	41	0,32	20	0,027	19
	M-2	41	0,32	27	0,013	40
	I-2	23	0,25	53	0,005	84
c34p13s53 Tipo A	S-2					
	M-2	17	0,20	60	0,010	31
	I-2	27	0,32	46	0,008	83
c35p43s33 Tipo A	S-2	26	0,32	58	0,008	31
	M-2	19	1,40	63	0,008	24
	I-2	21	0,32	53	0,006	83
c36p35s33 Tipo A	S-2	17	0,32	64	0,008	13
	M-2	17	0,25	61	0,008	19
	I-2	23	0,32	48	0,010	51
c37p26s33 Tipo A	S-2	29	0,25	37	0,008	
	M-2	26	0,32	48	0,008	83
	I-2	22	0,32	57	0,005	19
c40p34s100 Tipo A	S-2	20	0,32	47	0,008	107
	M-2	23	0,32	50	0,006	51
	I-2	27	0,32	58	0,006	24
cc1p43s100 Tipo D	S-2	24	0,30	60	0,006	24
	M-2	19	0,20	64	0,006	11
	I-2	24	0,32	58	0,008	24
sin referencia Tipo D	S-2	18	0,32	62	0,005	15
	M-2	18	0,25	68	0,005	7
	I-2	18	0,32	59	0,006	31

% total: porcentaje del total de poros intruido por mercurio
 poros grandes: >6 µm; medios: de 6 a 0,2 µm; pequeños: entre 0,2 y 0,006 µm
 coeficiente de uniformidad: diámetro₄₀/diámetro₈₀

ANEXO VII

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EDOMÉTRICOS CON SUCCIÓN CONTROLADA

EDÓMETRO SUCCIÓN CONTROLADA CON DISOLUCIÓN DE SULFÚRICO A 20 °C

EDS1_10

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Tipo ensayo: E5

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 13,7

w final (%): 35,0

Sección (cm²): 11,40

ρ_d inicial (g/cm³): 1,68

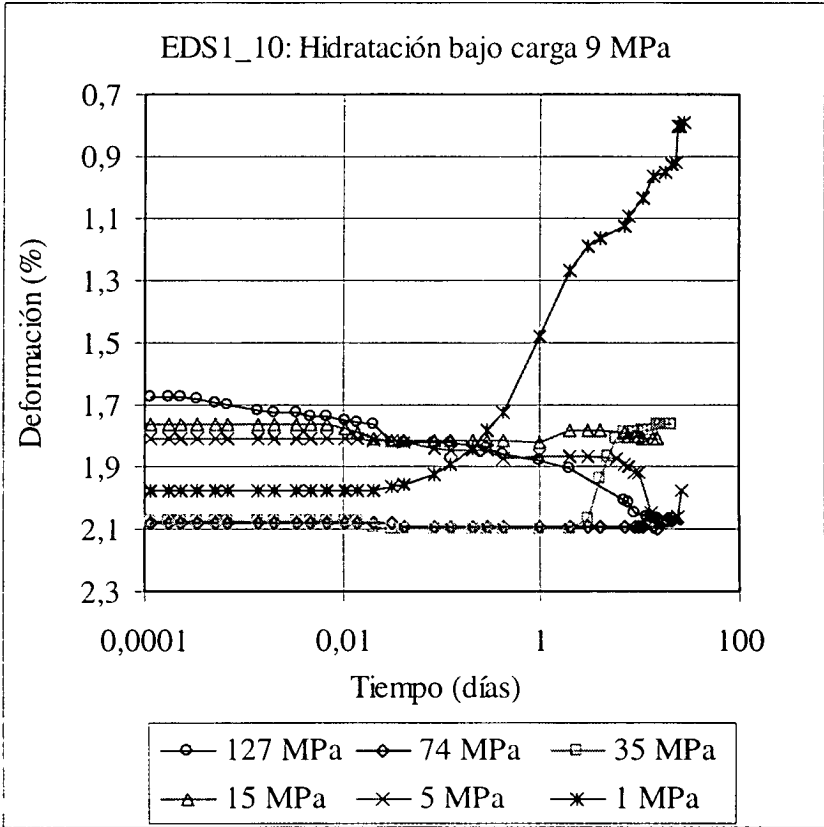
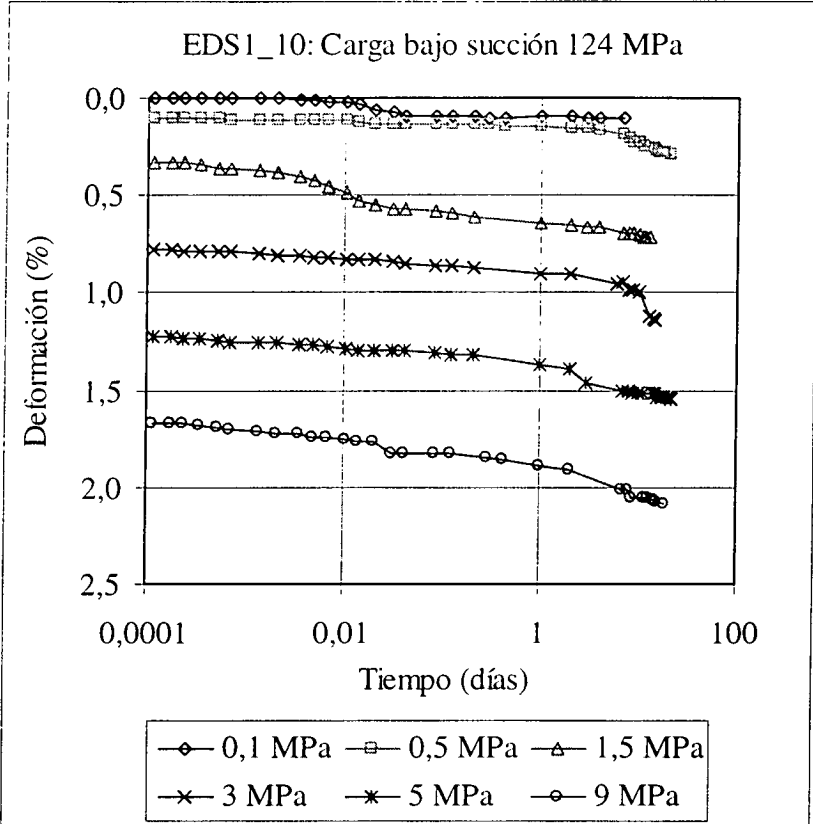
ρ_d final (g/cm³): 1,49

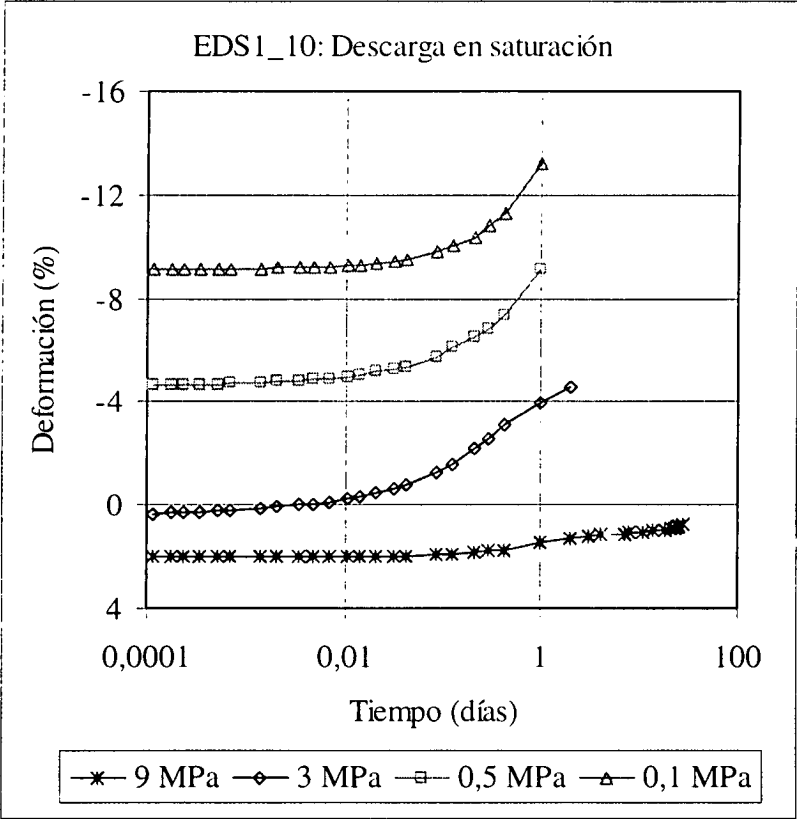
ρ_d f medida: 1,45

Sr inicial: 61

Sr final: 116

ESCALÓN	ρ_d i (g/cm³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ_d f (g/cm³)	e final	Días
1	1,68	126,3	0,1	1,68	0,603	7
2	1,68	126,7	0,5	1,69	0,600	21
3	1,69	126,7	1,5	1,70	0,593	13
4	1,70	126,7	3,0	1,70	0,586	20
5	1,70	126,7	5,1	1,71	0,580	22
6	1,71	127,1	9,1	1,72	0,571	19
7	1,72	73,7	9,1	1,72	0,571	21
8	1,72	35,2	9,1	1,71	0,576	21
9	1,71	14,9	9,1	1,71	0,575	15
10	1,71	4,5	9,1	1,72	0,573	27
11	1,72	1,3	9,1	1,70	0,592	28
12	1,70	1,3	3,0	1,61	0,678	2
13	1,61	1,3	0,5	1,54	0,750	1
14	1,54	1,3	0,1	1,49	0,817	1





ENSAYO PRESIÓN DE HINCHAMIENTO CON SUCCIÓN CONTROLADA EN EDÓMETRO
 CON DISOLUCIÓN DE SULFÚRICO A 20°C

EDS2_8

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Tipo ensayo: E4

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 12,6

w final (%): 23,8

Sección (cm²): 11,40

ρ_d inicial (g/cm³): 1,73

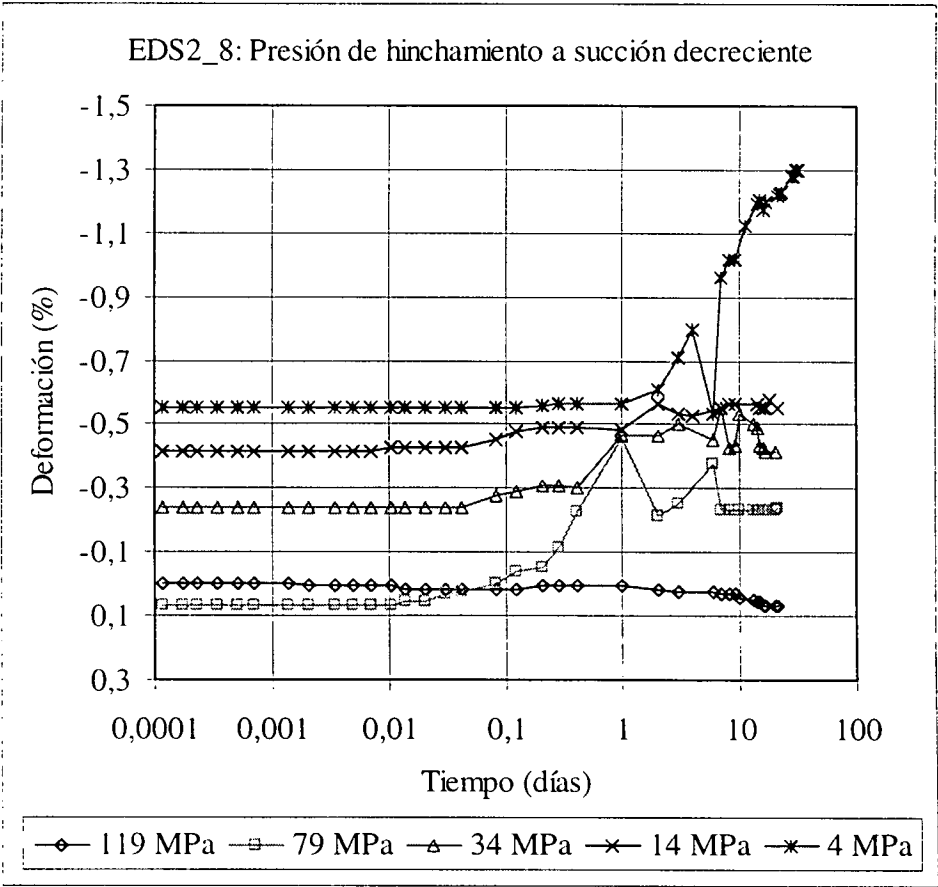
ρ_d final (g/cm³): 1,70

ρ_d f medida: 1.67

S_r inicial: 60

S_r final: 110

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,73	119,2	0,0	1,73	0,564	20
2	1,73	79,3	1,7	1,72	0,569	20
3	1,72	34,2	6,5	1,72	0,572	21
4	1,72	14,2	9,2	1,72	0,574	22
5	1,72	4,4	9,5	1,70	0,585	21



ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA CON DISOLUCIÓN DE SULFÚRICO A 20°C

EDS2_9

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Tipo ensayo: E6

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 12,9

w final (%): 30,2

Sección (cm²): 11,40

ρ_d inicial (g/cm³): 1,71

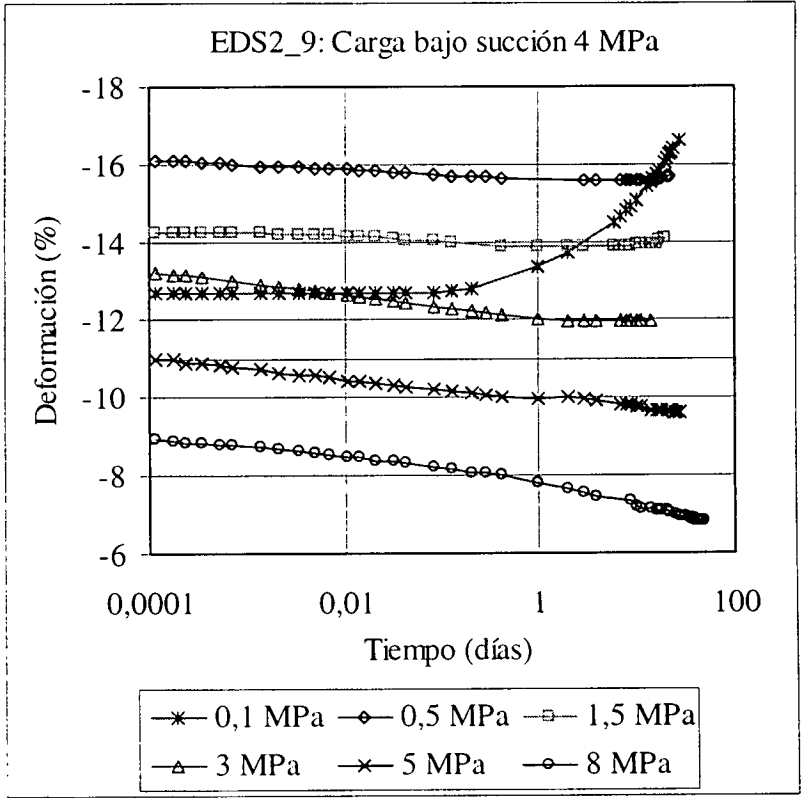
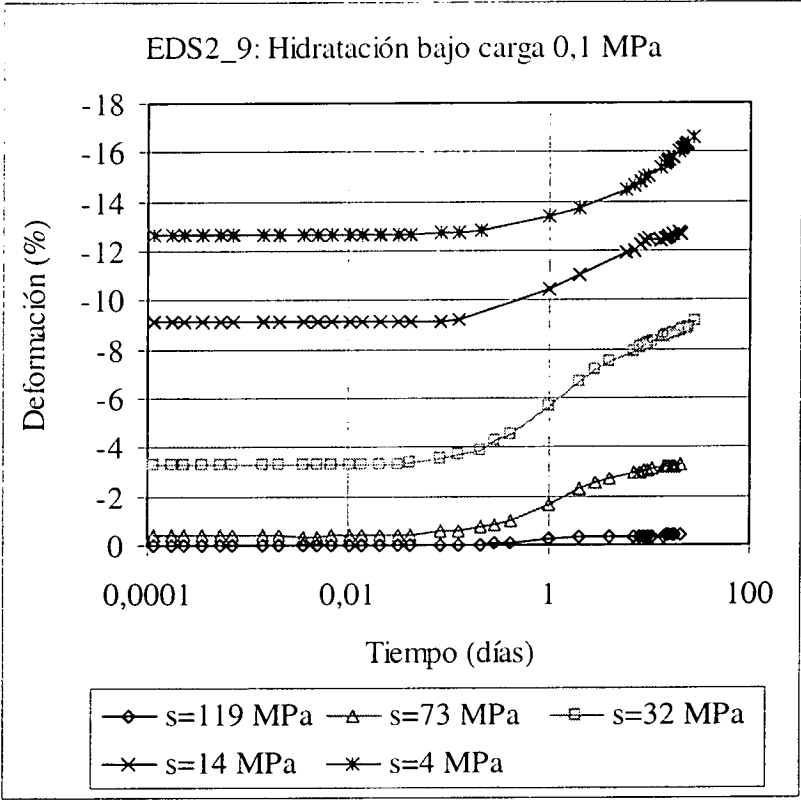
ρ_d final (g/cm³): 1,53

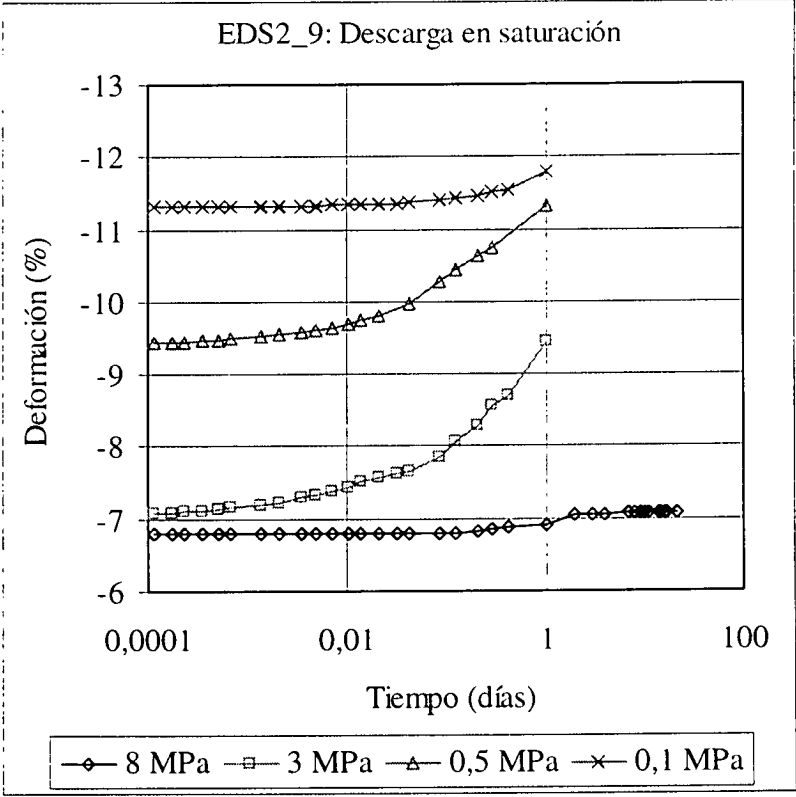
ρ_d f medida: 1,53

S_r inicial: 60

S_r final: 107

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm³)	e final	Días
1	1,71	119,2	0,1	1,71	0,581	21
2	1,71	73,2	0,1	1,66	0,626	21
3	1,66	31,9	0,1	1,57	0,718	28
4	1,57	13,8	0,1	1,52	0,775	21
5	1,52	3,7	0,1	1,47	0,837	27
6	1,47	3,9	0,5	1,48	0,822	22
7	1,48	3,9	1,5	1,50	0,797	20
8	1,50	3,9	3,0	1,53	0,764	14
9	1,53	3,9	4,9	1,56	0,727	28
10	1,56	4,1	8,4	1,60	0,682	49
11	1,60	1,3	8,4	1,60	0,687	21
12	1,60	1,3	3,0	1,57	0,724	1
13	1,57	1,3	0,5	1,54	0,753	1
14	1,54	1,3	0,1	1,53	0,761	1





ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA CON DISOLUCIÓN DE SULFÚRICO A 20°C

EDS3_9

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Ensayo tipo: E2

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 13,0

w final (%): 35,9

Sección (cm²): 19,24

ρ_d inicial (g/cm³): 1,72

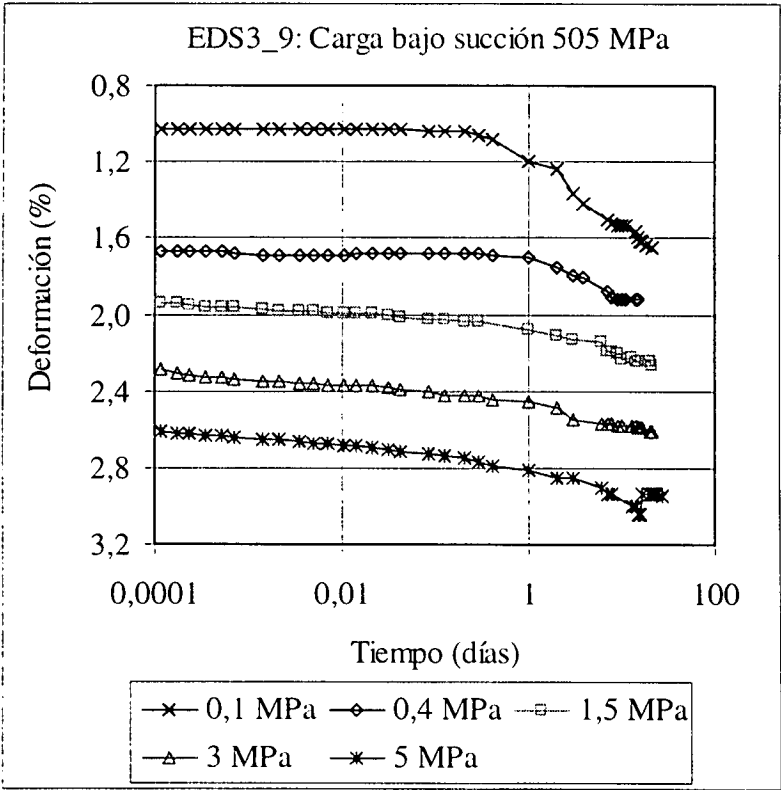
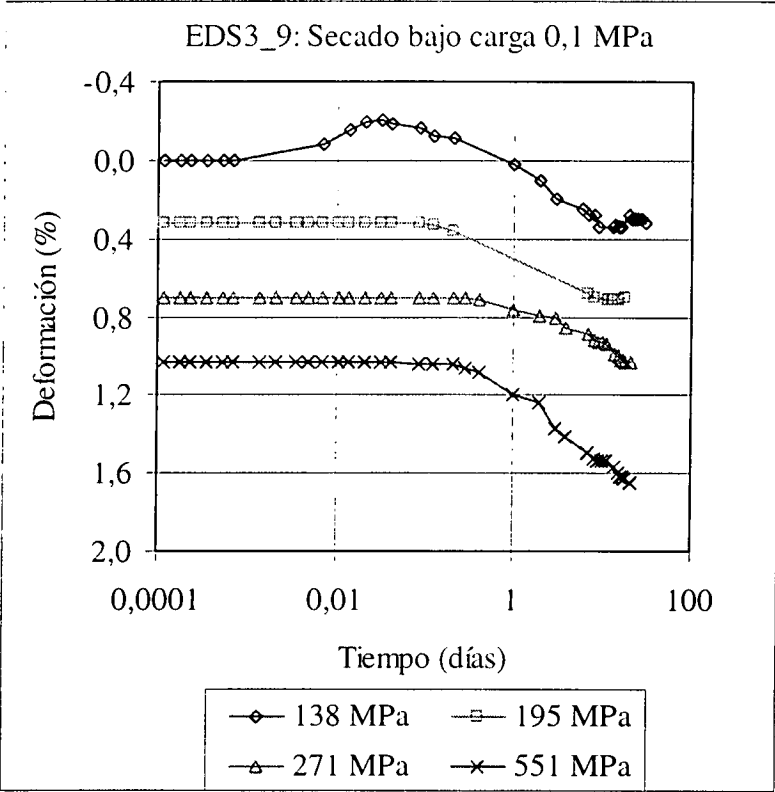
ρ_d final (g/cm³): 1,45

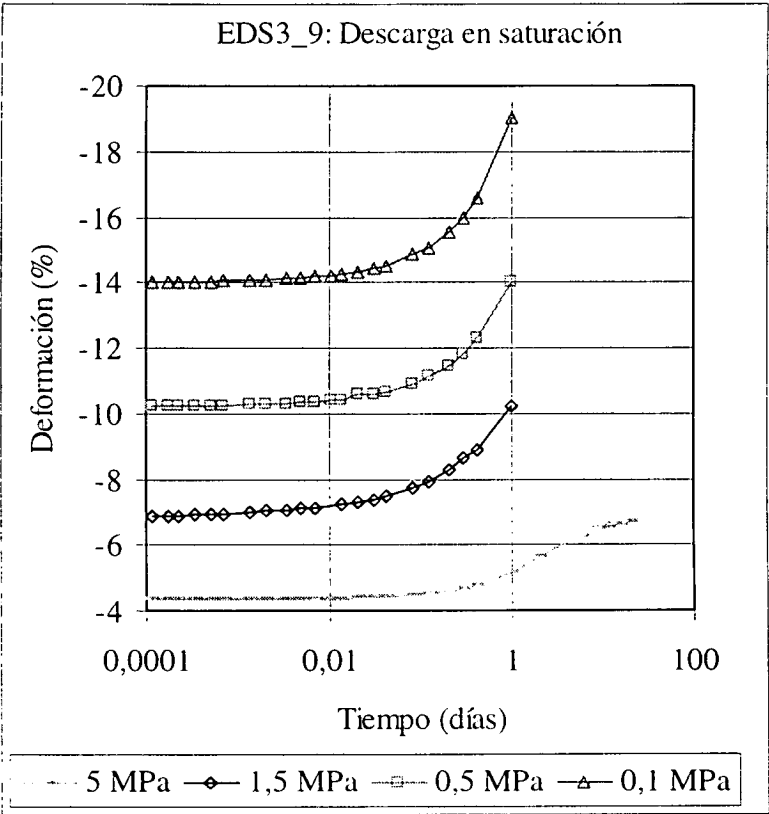
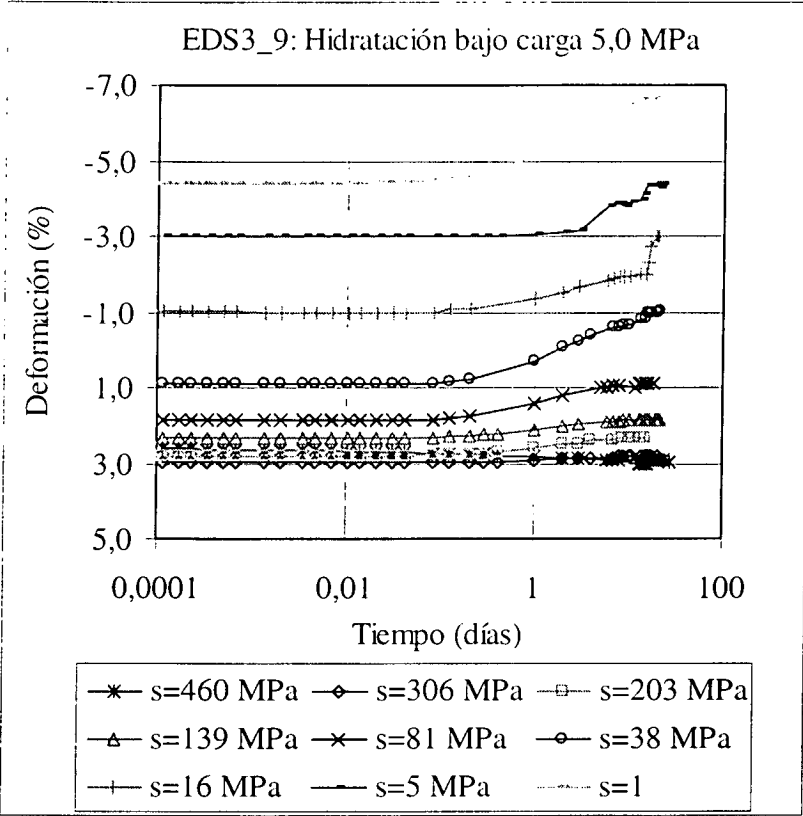
ρ_d f medida: 1,41

S_r inicial: 62

S_r final: 112

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,72	138,1	0,1	1,73	0,564	30
2	1,73	195,5	0,1	1,73	0,558	18
3	1,73	271,5	0,1	1,74	0,553	21
4	1,74	550,6	0,1	1,75	0,543	21
5	1,75	505,5	0,4	1,75	0,539	15
6	1,75	505,5	1,5	1,76	0,533	21
7	1,76	505,5	3,0	1,77	0,528	21
8	1,77	460,4	5,1	1,77	0,523	27
9	1,77	306,3	5,1	1,77	0,525	21
10	1,77	202,9	5,1	1,76	0,532	15
11	1,76	138,9	5,1	1,75	0,540	22
12	1,75	81,0	5,1	1,74	0,555	19
13	1,74	37,8	5,1	1,70	0,585	22
14	1,70	15,5	5,1	1,67	0,616	21
15	1,67	4,5	5,1	1,65	0,638	22
16	1,65	1,3	5,1	1,61	0,674	20
17	1,61	1,3	1,5	1,56	0,729	1
18	1,56	1,3	0,5	1,51	0,789	1
19	1,51	1,3	0,1	1,45	0,867	1





EDÓMETRO SUCCIÓN CONTROLADA CON DISOLUCIÓN DE SULFÚRICO A 20 °C

EDS3_10

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Tipo ensayo: E1/2

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 13,4

w final (%): 26,3

Sección (cm²): 11,40

ρ_d inicial (g/cm³): 1,71

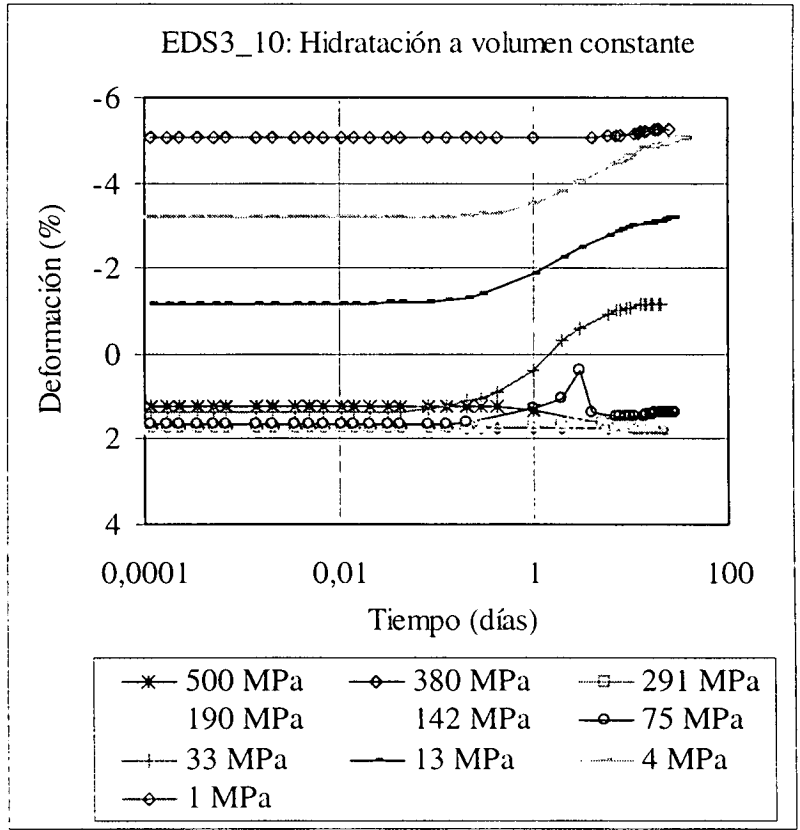
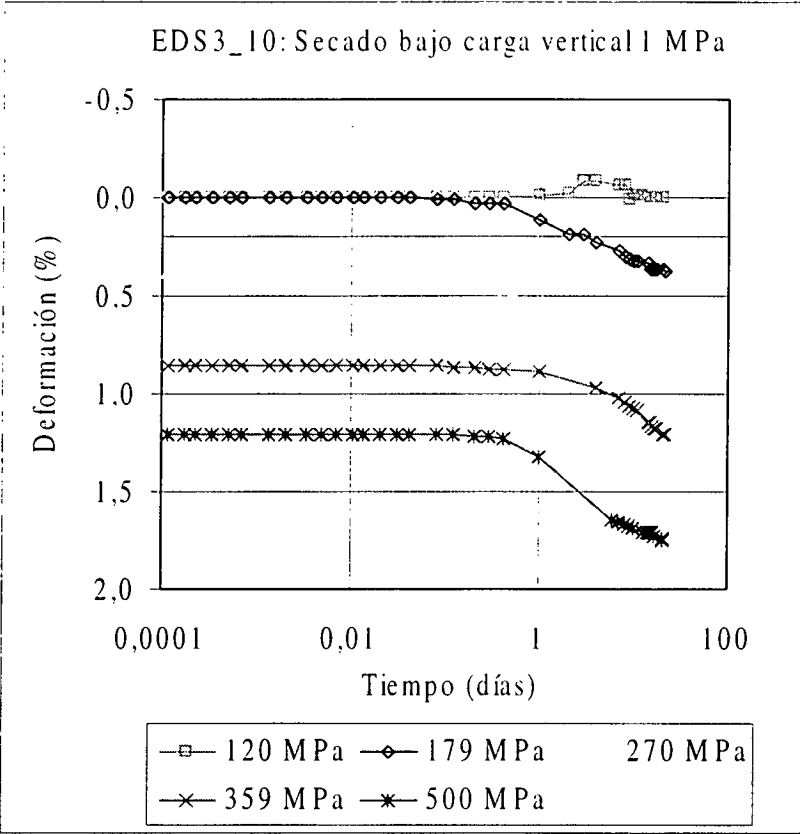
ρ_d final (g/cm³): 1,57

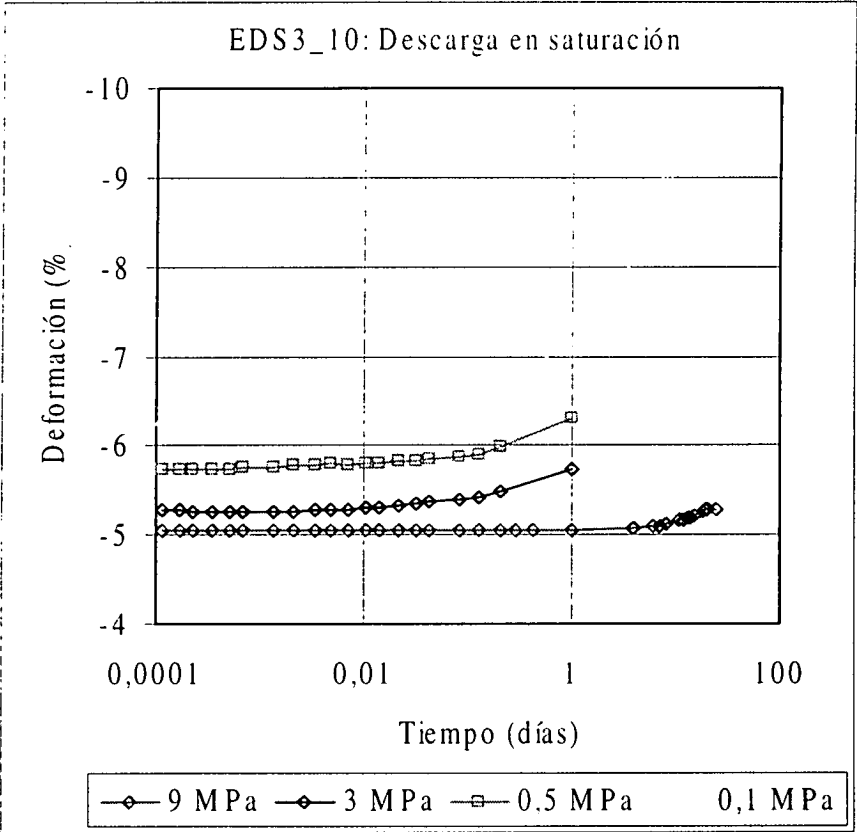
ρ_d f medida: 1,51

S_r inicial: 63

S_r final: 98

ESCALÓN	ρ_{di} (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ_{df} (g/cm ³)	e final	Días
1	1,71	119,9	0,1	1,71	0,577	21
2	1,71	179,5	0,1	1,72	0,571	22
3	1,72	270,0	0,1	1,73	0,564	20
4	1,73	359,4	0,1	1,73	0,558	22
5	1,73	500,0	0,1	1,74	0,550	21
6	1,74	380,0	0,1	1,74	0,550	22
7	1,74	291,0	0,4	1,74	0,549	21
8	1,74	189,6	1,8	1,74	0,550	41
9	1,74	141,6	3,6	1,74	0,551	20
10	1,74	75,4	9,0	1,74	0,556	29
11	1,74	32,6	9,0	1,69	0,596	21
12	1,69	13,0	9,0	1,66	0,627	28
13	1,66	3,8	9,0	1,63	0,657	37
14	1,63	1,3	9,0	1,63	0,660	25
15	1,63	1,3	3,0	1,62	0,667	1
16	1,62	1,3	0,5	1,61	0,676	1
17	1,61	1,3	0,1	1,57	0,723	9



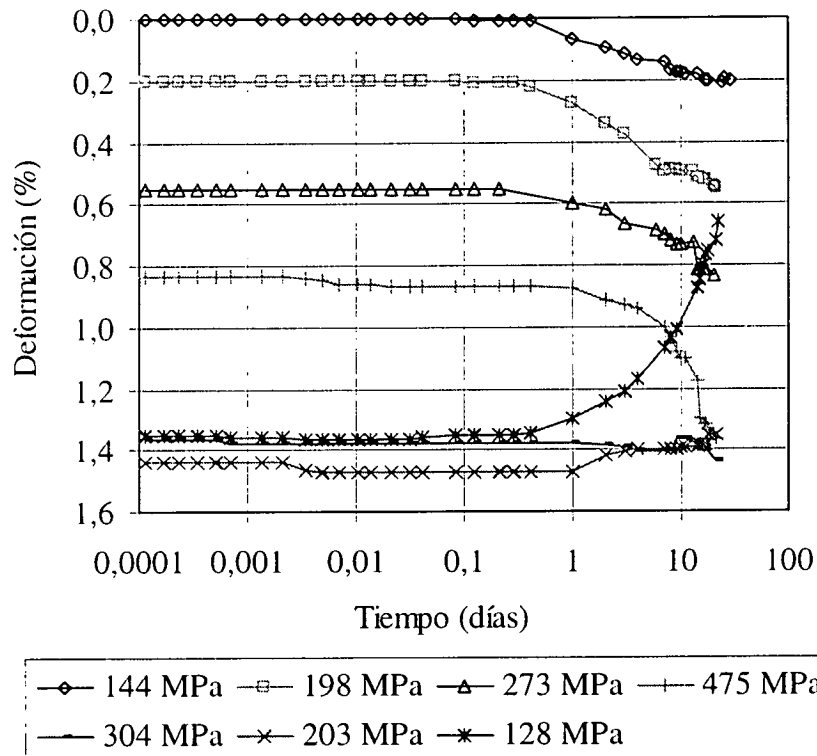


ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA CON DISOLUCIÓN DE SULFÚRICO A 20°C

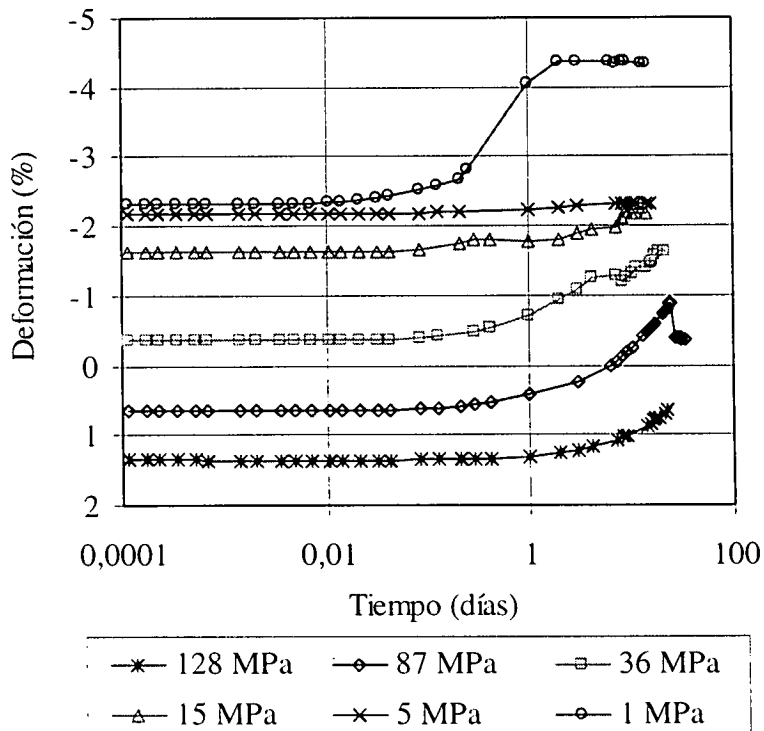
EDS4_6 ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0 Ensayo tipo: E1/1
Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 14,2 w final (%): 34,5
Sección (cm²): 19,24 ρ_d inicial (g/cm³): 1,70 ρ_d final (g/cm³): 1,50
ρ_d f medida: 1,48 S_r inicial: 66 S_r final: 117

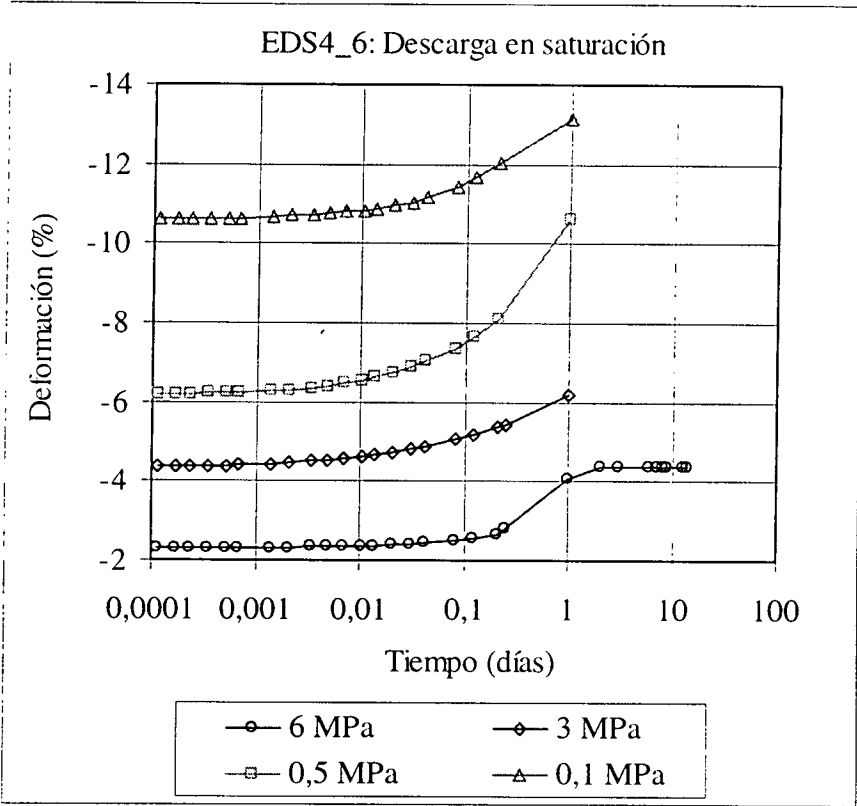
ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,70	144,3	0,1	1,71	0,583	29
2	1,71	198,0	0,1	1,71	0,577	21
3	1,71	273,3	0,1	1,72	0,573	20
4	1,72	474,7	0,1	1,73	0,564	21
5	1,73	304,2	0,1	1,73	0,563	21
6	1,73	202,9	0,1	1,73	0,565	21
7	1,73	127,9	0,1	1,71	0,576	22
8	1,71	87,5	0,4	1,70	0,592	34
9	1,70	36,5	1,2	1,67	0,612	21
10	1,67	15,1	2,8	1,67	0,621	14
11	1,67	4,6	3,3	1,66	0,623	15
12	1,66	1,3	5,7	1,63	0,655	14
13	1,63	1,3	3,0	1,60	0,684	1
14	1,60	1,3	0,5	1,54	0,754	1
15	1,54	1,3	0,1	1,50	0,794	1

EDS4_6: Secado/humectación bajo carga 0,1 MPa



EDS4_6: Presión de hinchamiento a succión decreciente





EDÓMETRO SUCCIÓN CONTROLADA CON DISOLUCIÓN DE SULFÚRICO A 20 °C

EDS4_8

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Ensayo tipo: E3

Altura inicial (cm): 1,20

w inicial (%): 12,8

w final (%): 32,2

Sección (cm²): 19,24

ρ_d inicial (g/cm³): 1,71

ρ_d final (g/cm³): 1,32

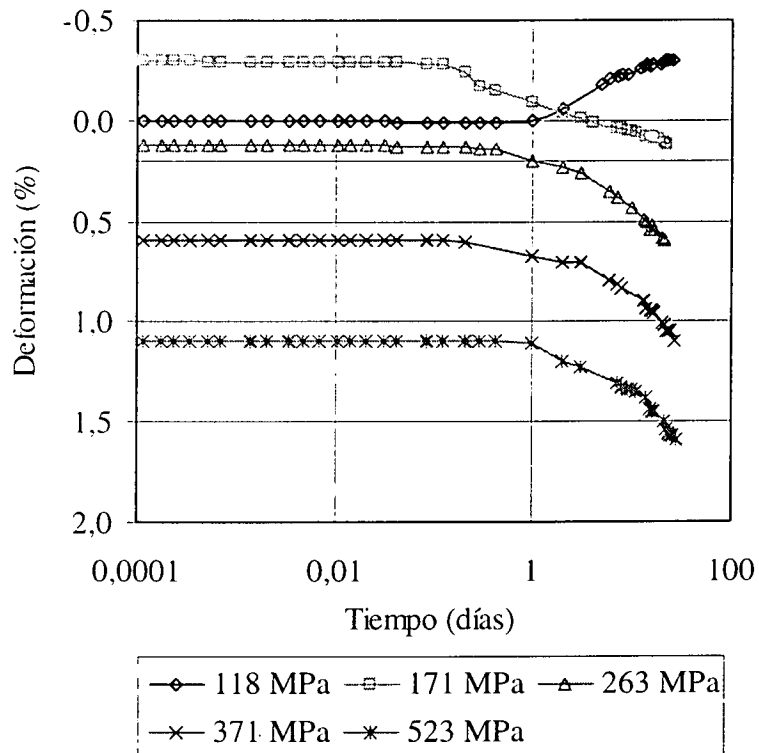
ρ_d f medida: 1,32

S_r inicial: 59

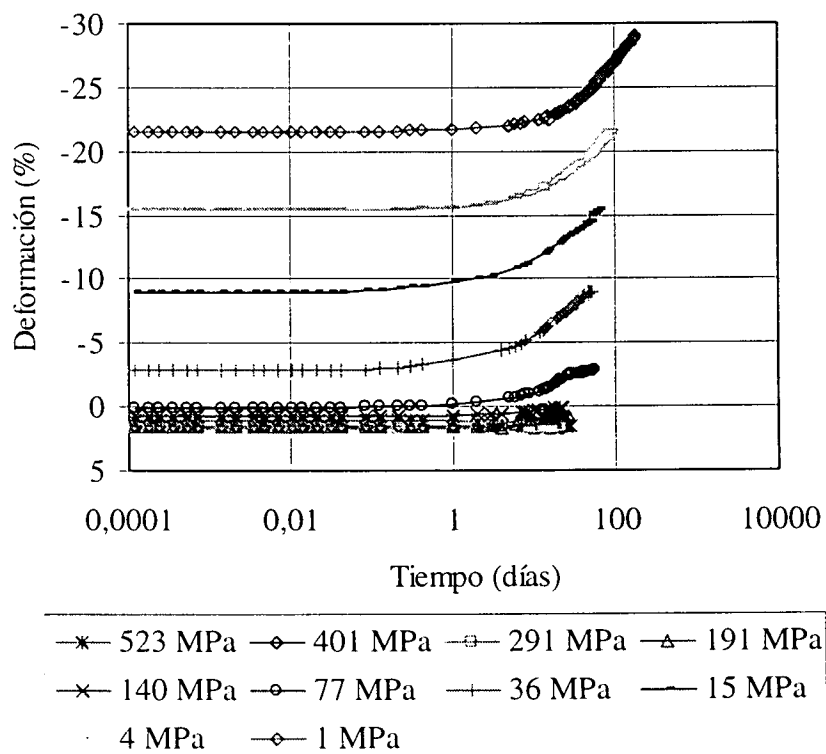
S_r final: 84

ESCALÓN	ρ_d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ_d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,71	118	0,1	1,70	0,587	26
2	1,70	171	0,1	1,71	0,580	22
3	1,71	263	0,1	1,72	0,573	21
4	1,72	371	0,1	1,73	0,565	27
5	1,73	523	0,1	1,73	0,557	28
6	1,73	401	0,1	1,74	0,556	22
7	1,74	291	0,1	1,73	0,556	21
8	1,73	191	0,1	1,72	0,571	27
9	1,72	140	0,1	1,71	0,581	23
10	1,71	77	0,1	1,66	0,626	57
11	1,66	36	0,1	1,57	0,724	54
12	1,57	15	0,1	1,48	0,826	63
13	1,48	4	0,1	1,40	0,923	92
14	1,40	1,4	0,1	1,32	1,040	176

EDS4_8: Secado bajo carga vertical 0,1 MPa



EDS4_8:Hidratación bajo carga vertical 0,1 MPa



ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA CON DISOLUCIÓN DE SULFÚRICO A 20°C

EDS5_5

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Ensayo tipo: E3

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 13,2

w final (%): 45,3

Sección (cm²): 19,24

ρ_d inicial (g/cm³): 1,72

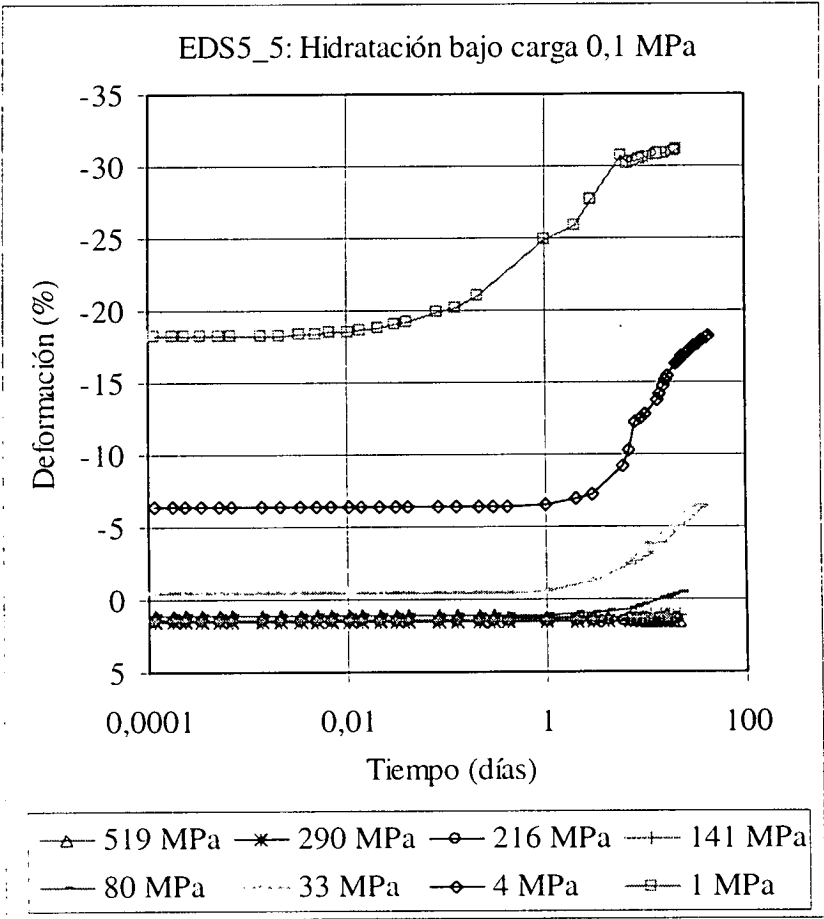
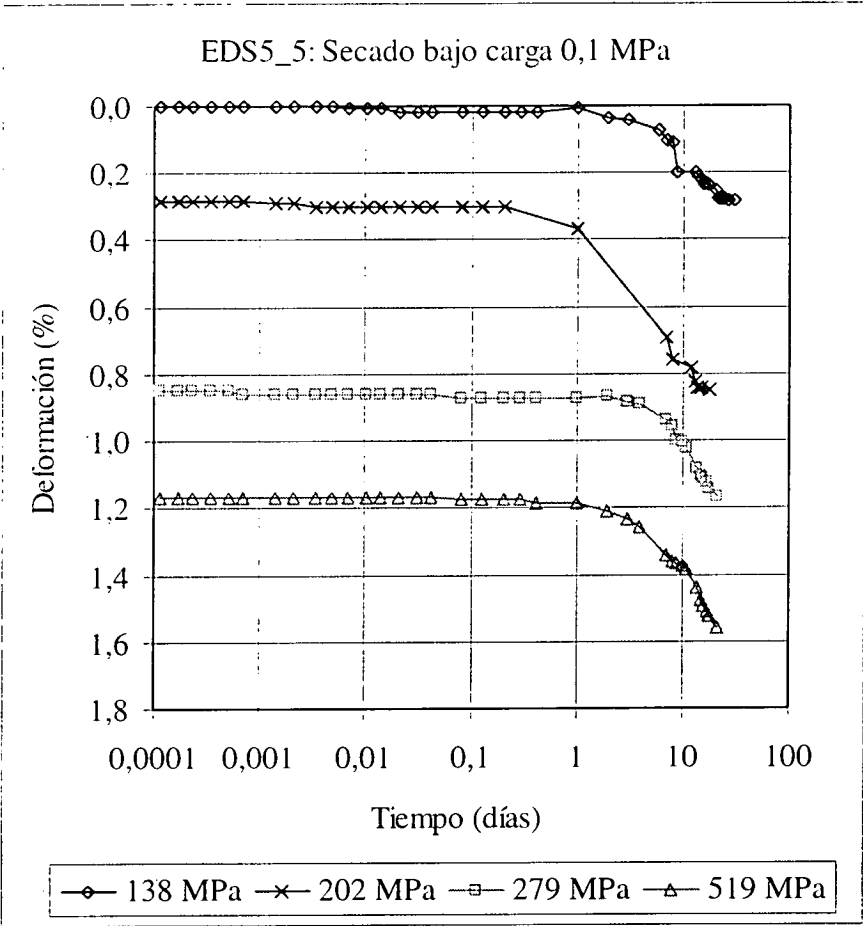
ρ_d final (g/cm³): 1,26

ρ_d f medida: 1.26

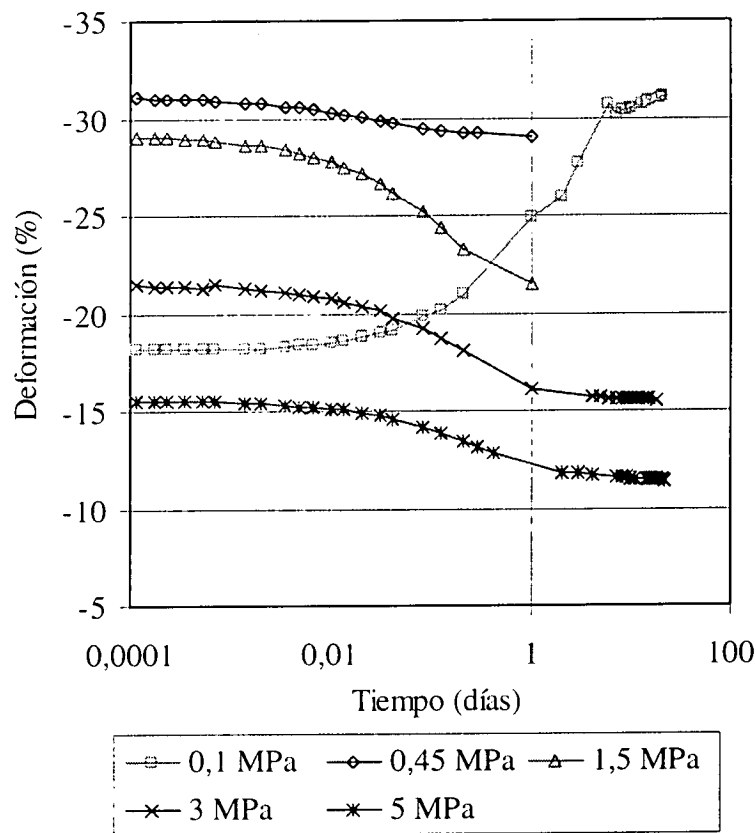
S_r inicial: 62

S_r final: 107

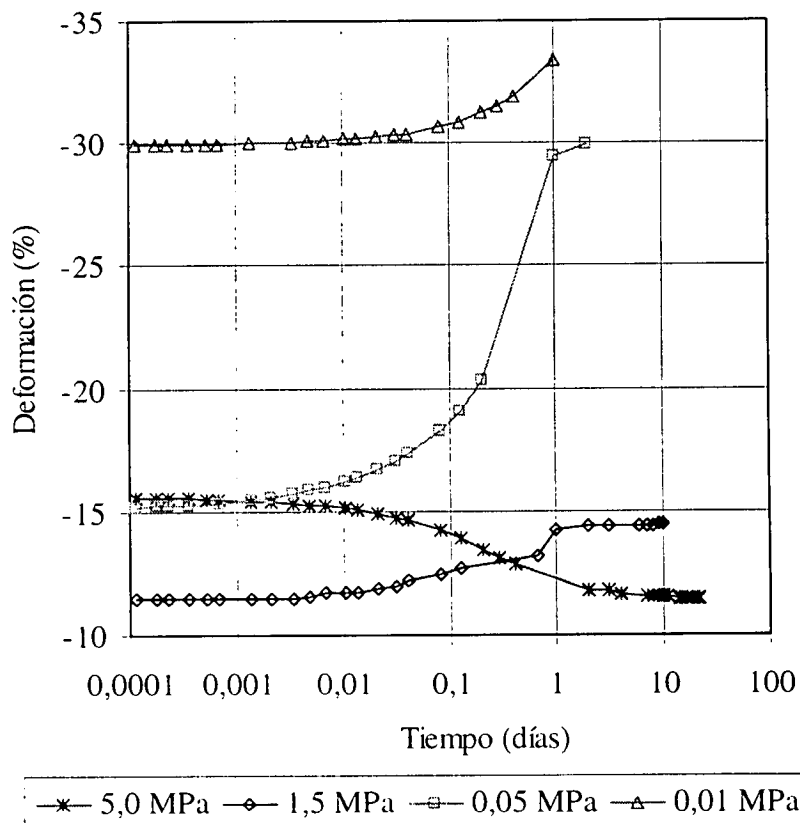
ESCALÓN	ρ _d i (g/cm³)	Succión MPa	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm³)	e final	Días
1	1,72	138,1	0,1	1,72	0,567	30
2	1,72	201,7	0,1	1,73	0,558	18
3	1,73	278,7	0,1	1,74	0,553	21
4	1,74	519,5	0,1	1,75	0,546	21
5	1,75	290,1	0,1	1,75	0,547	15
6	1,75	216,0	0,1	1,74	0,549	20
7	1,74	140,7	0,1	1,74	0,554	21
8	1,74	79,8	0,1	1,71	0,578	22
9	1,71	33,2	0,1	1,62	0,671	35
10	1,62	4,3	0,1	1,45	0,856	42
11	1,45	1,3	0,1	1,31	1,059	21
12	1,31	1,3	0,4	1,33	1,027	1
13	1,33	1,3	1,5	1,41	0,908	1
14	1,41	1,3	3,0	1,49	0,815	18
15	1,49	1,3	5,0	1,54	0,751	22
16	1,54	1,3	1,5	1,50	0,798	10
17	1,50	1,3	0,05	1,32	1,041	2
18	1,32	1,3	0,01	1,26	1,148	1



EDS5_5: Carga en saturación



EDS5_5: Descarga en saturación



ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA POR PRESIÓN DE NITRÓGENO
 A 20°C

EDN1_5

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Tipo ensayo: E2

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 13,6

w final (%): 36,4

Sección (cm²): 19,24

ρ_d inicial 1,72 (g/cm³):

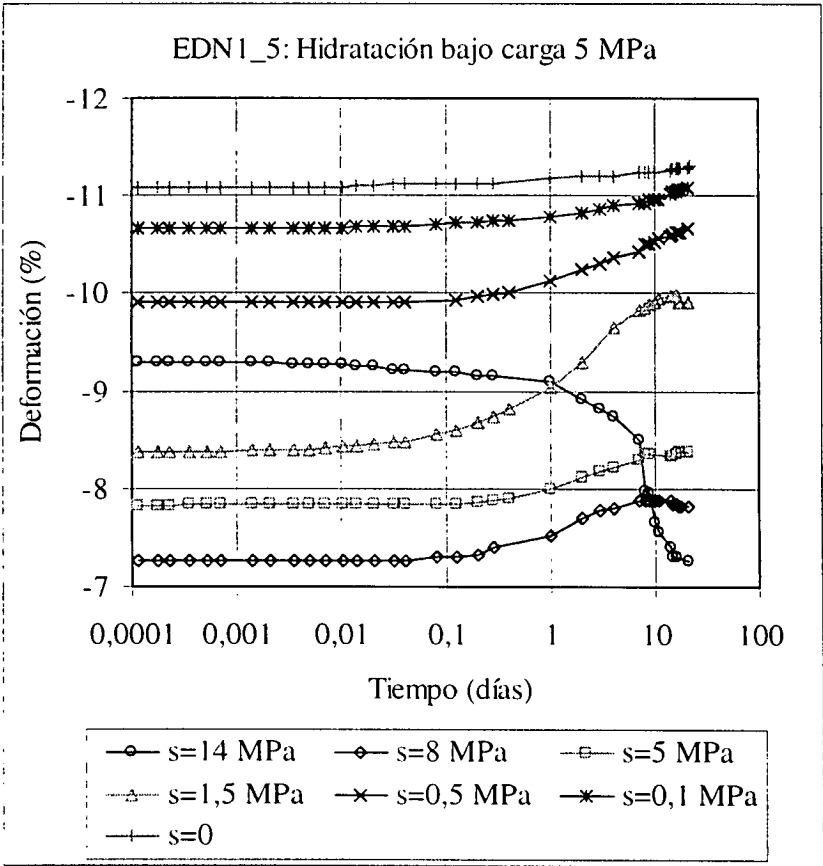
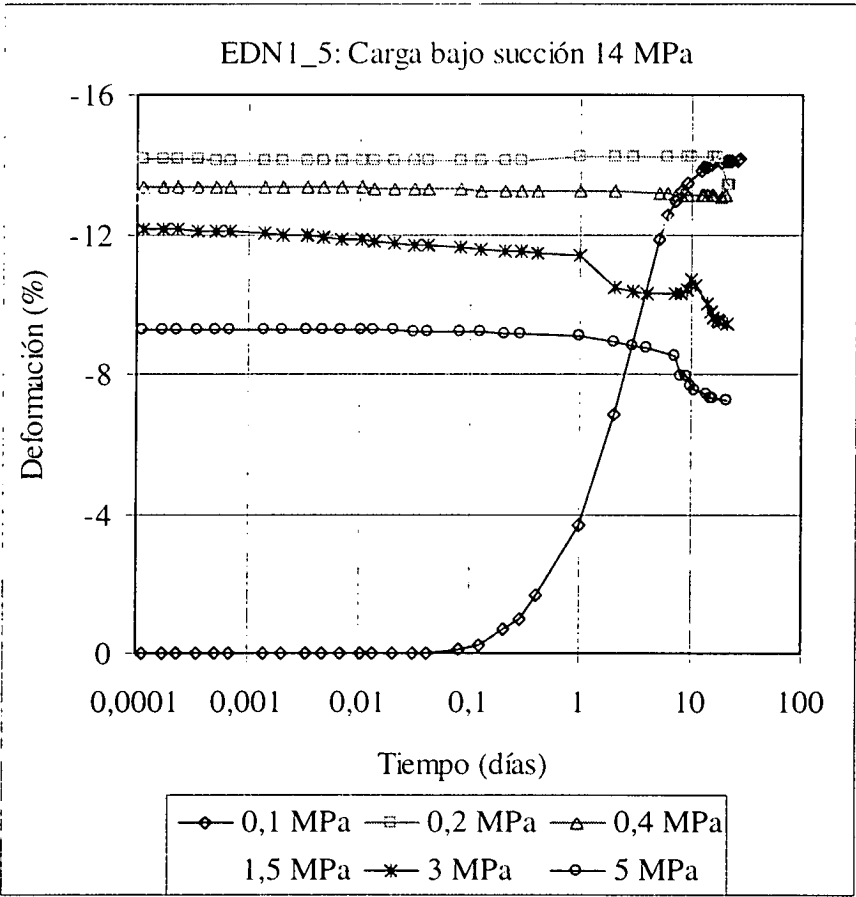
ρ_d final (g/cm³): 1,38

ρ_d f medida (g/cm³): 1.39

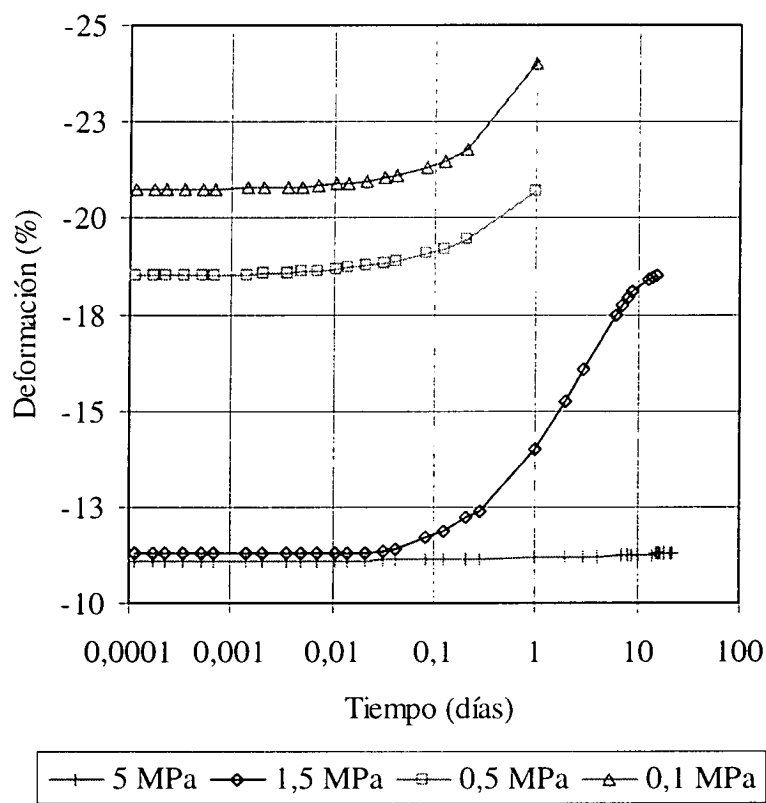
S_r inicial: 64

S_r final: 103

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,72	14,0	0,1	1,50	0,794	27
2	1,50	14,0	0,2	1,51	0,782	22
3	1,51	14,0	0,4	1,52	0,778	20
4	1,52	14,0	1,5	1,53	0,764	20
5	1,53	14,0	3,0	1,57	0,720	21
6	1,57	14,0	5,0	1,60	0,686	21
7	1,60	8,0	5,0	1,59	0,695	21
8	1,59	5,0	5,0	1,58	0,704	21
9	1,58	1,5	5,0	1,56	0,728	21
10	1,56	0,5	5,0	1,55	0,740	21
11	1,55	0,1	5,0	1,55	0,746	21
12	1,55	0,0	5,0	1,54	0,750	22
13	1,54	0,0	1,5	1,45	0,863	15
14	1,45	0,0	0,5	1,42	0,898	1
15	1,42	0,0	0,1	1,38	0,950	1



EDN1_5: Descarga en saturación



ENSAYO PRESIÓN DE HINCHAMIENTO CON SUCCIÓN CONTROLADA EN EDÓMETRO DE NITRÓGENO A 20°C

EDN2_10

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Tipo ensayo: E4/1

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 13,9

w final (%): 27,6

Sección (cm²): 19,24

ρ_d inicial (g/cm³): 1,71

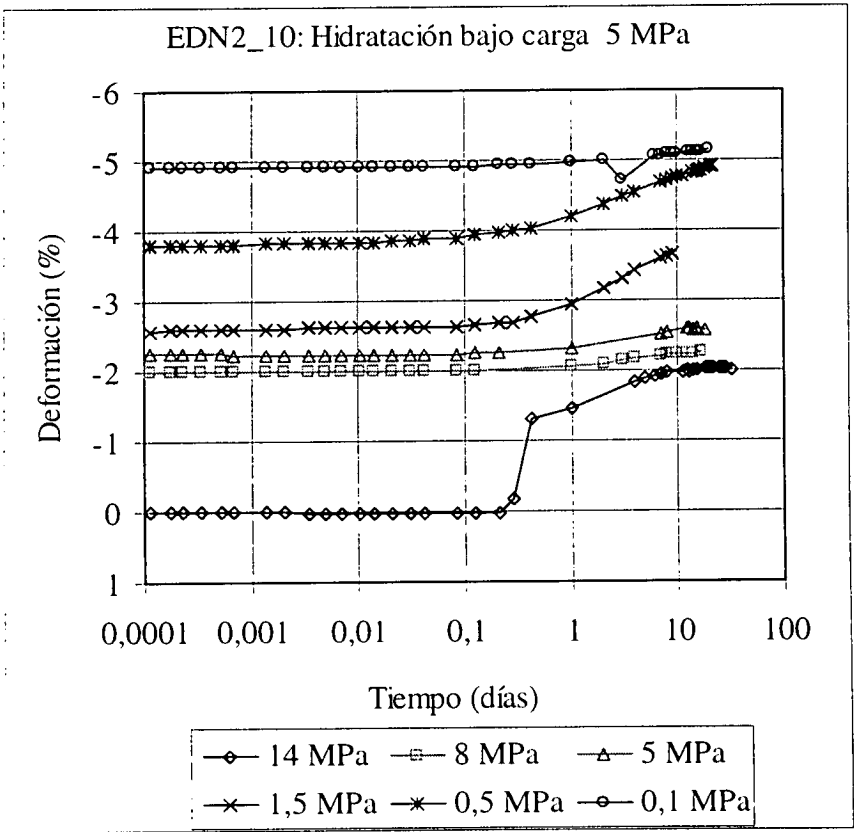
ρ_d final (g/cm³): 1,63

ρ_d f medida (g/cm³): 1,56

S_r inicial: 65

S_r final: 113

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,71	14,0	5,4	1,68	0,608	32
2	1,68	8,0	5,3	1,67	0,612	17
3	1,67	5,0	5,4	1,67	0,618	18
4	1,67	1,5	5,4	1,65	0,637	21
5	1,65	0,5	5,0	1,63	0,654	22
6	1,63	0,1	5,0	1,63	0,658	20



ENSAYO PRESIÓN DE HINCHAMIENTO CON SUCCIÓN CONTROLADA EN EDÓMETRO DE NITRÓGENO A 20°C

EDN3_9 ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0 Tipo ensayo: E4/2

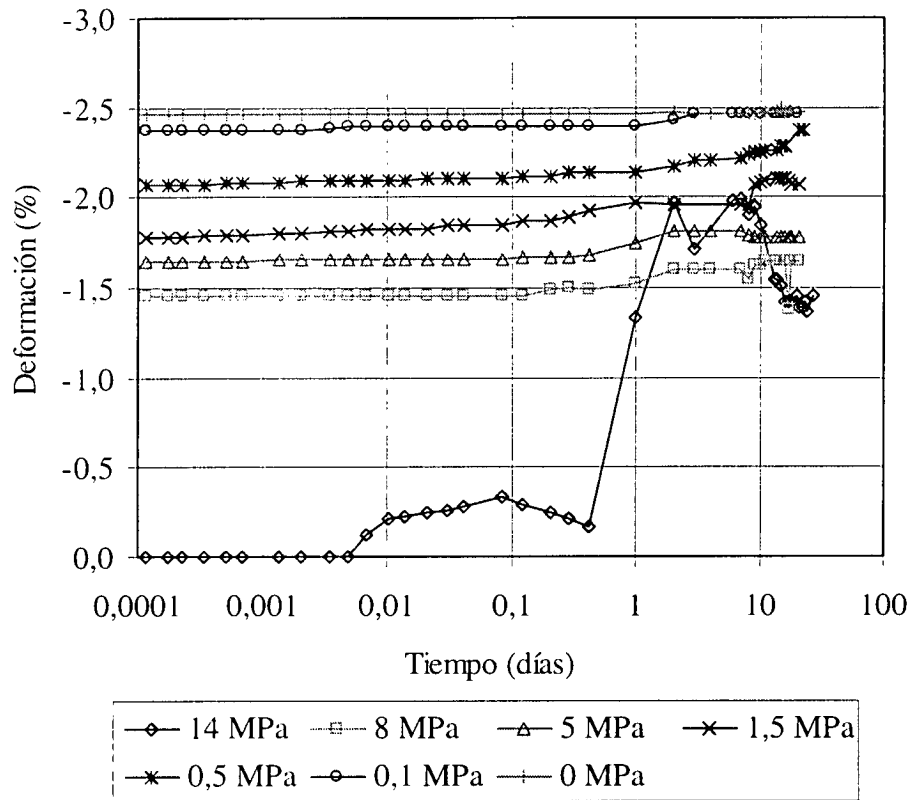
Altura inicial (cm): 1,2 w inicial (%): 13,0 w final (%): 34,9

Sección (cm²): 11,40 ρ_d inicial (g/cm³): 1,72 ρ_d final (g/cm³): 1,43

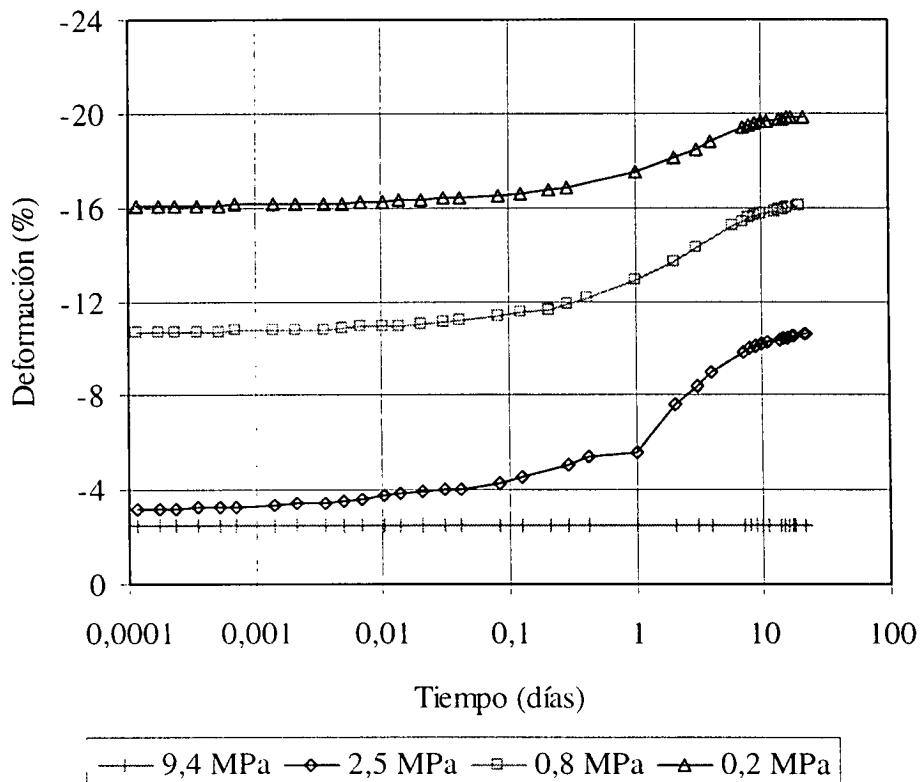
ρ_d f medida (g/cm³): 1,42 S_r inicial: 62 S_r final: 107

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,72	14,0	7,4	1,69	0,593	27
2	1,69	8,0	8,9	1,69	0,596	21
3	1,69	5,0	9,1	1,69	0,598	21
4	1,69	1,5	9,3	1,68	0,603	21
5	1,68	0,5	9,4	1,68	0,608	22
6	1,68	0,1	9,4	1,68	0,609	20
7	1,68	0,0	9,5	1,68	0,609	21
8	1,68	0,0	2,5	1,55	0,736	22
9	1,55	0,0	0,8	1,48	0,822	20
10	1,48	0,0	0,2	1,43	0,882	21

EDN3_9: Hidratación bajo carga vertical 9 MPa



EDN3_9: Descarga en saturación



ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA CON PRESIÓN DE NITRÓGENO A 20°C

EDN3_10

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Tipo ensayo: E2

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 14,2

w final (%): 31,5

Sección: 11,4

ρ_d inicial (g/cm³): 1,69

ρ_d final (g/cm³): 1,45

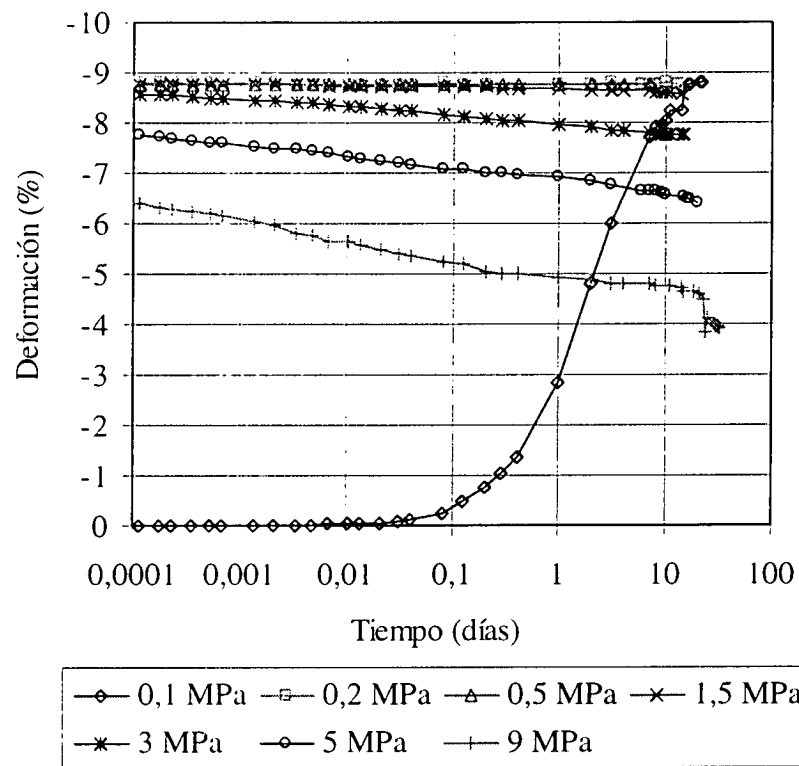
ρ_d f medida (g/cm³): 1,50

S_r inicial: 64

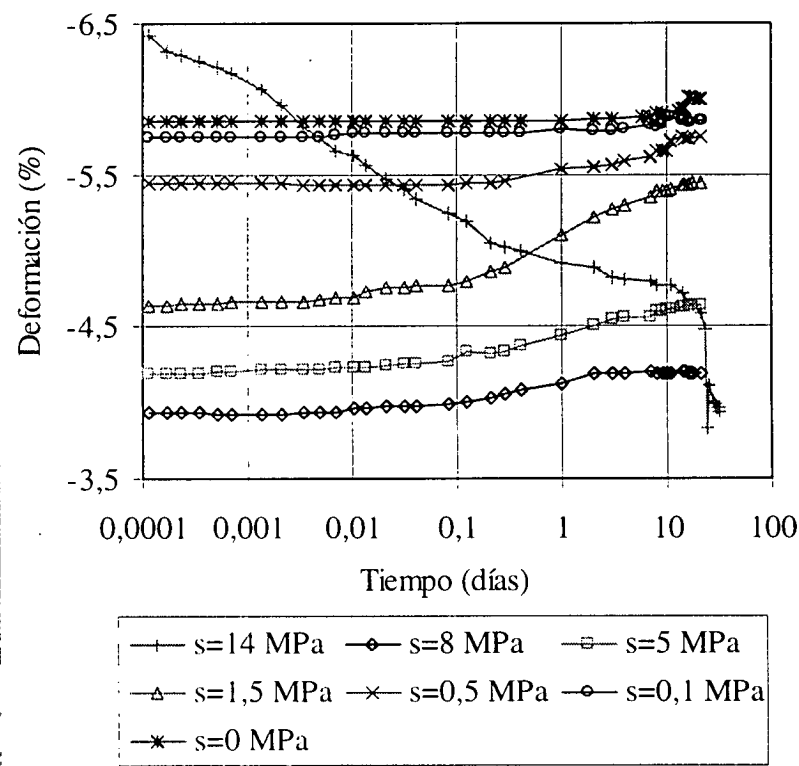
S_r final: 98

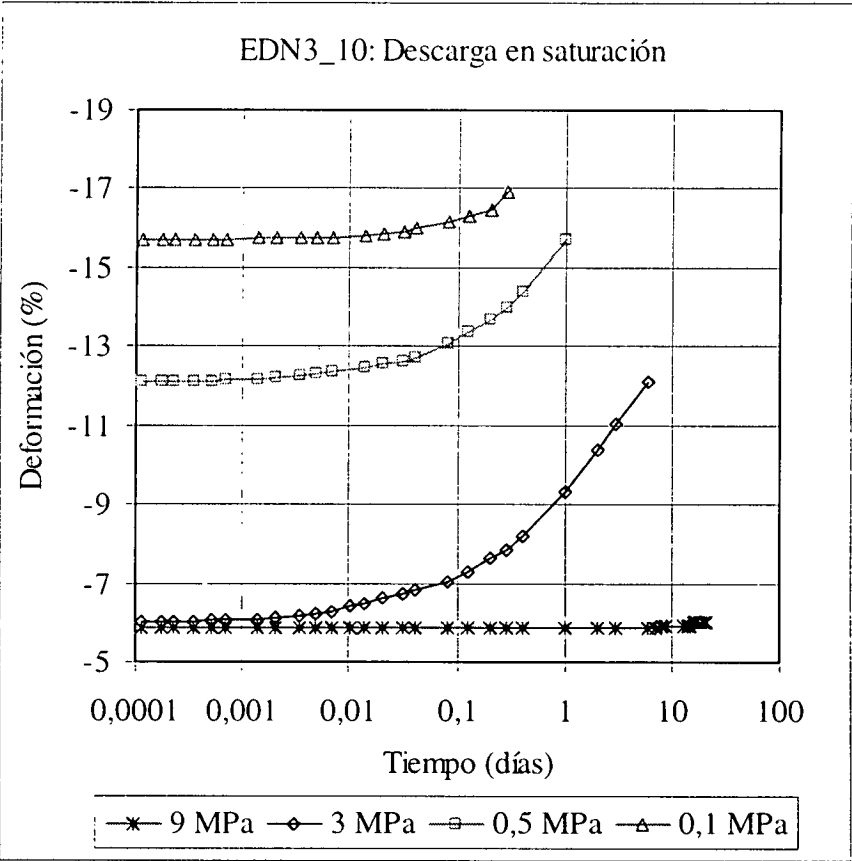
ESCALÓN	ρ_d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ_d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,69	14	0,1	1,55	0,737	22
2	1,55	14	0,2	1,55	0,737	13
3	1,55	14	0,5	1,55	0,737	7
4	1,55	14	1,5	1,56	0,734	14
5	1,56	14	3,0	1,57	0,721	15
6	1,57	14	5,0	1,59	0,699	20
7	1,59	14	9,0	1,63	0,660	32
8	1,63	8	9,0	1,62	0,664	21
9	1,62	5	9,0	1,62	0,671	21
10	1,62	1,5	9,0	1,60	0,684	21
11	1,60	0,5	9,0	1,60	0,689	21
12	1,60	0,1	9,0	1,60	0,690	22
13	1,60	0	9,0	1,60	0,693	21
14	1,60	0	3,0	1,51	0,790	6
15	1,51	0	0,5	1,46	0,848	1
16	1,46	0	0,1	1,45	0,867	0,3

EDN3_10: Carga bajo succión 14 MPa



EDN3_10: Hidratación bajo carga 9 MPa





ENSAYO DE PRESIÓN DE HINCHAMIENTO CON SUCCIÓN CONTROLADA POR PRESIÓN DE NITRÓGENO A 20°C

EDN4_6

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Tipo ensayo: E4/1

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 13,3

w final (%): 27,7

Sección (cm²): 19,24

ρ_d inicial (g/cm³): 1,71

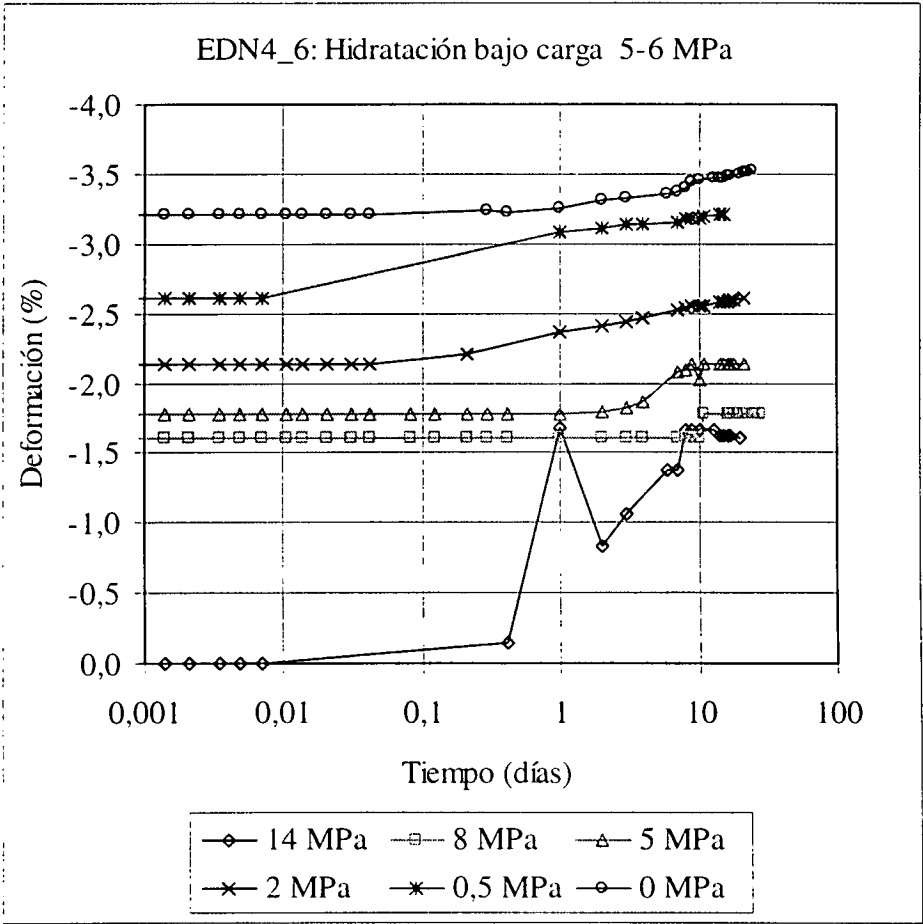
ρ_d final (g/cm³): 1,66

ρ_d f medida (g/cm³): 1,54

S_r inicial: 62

S_r final: 118

ESCALÓN	ρ_{di} (g/cm³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ_{df} (g/cm³)	e final	Días
1	1,71	14,0	5,0	1,69	0,601	20
2	1,69	8,0	5,3	1,68	0,604	28
3	1,68	5,0	5,7	1,68	0,609	21
4	1,68	2,0	6,0	1,67	0,617	21
5	1,67	0,5	5,8	1,66	0,626	15
6	1,66	0,0	5,8	1,66	0,631	24



ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA CON PRESIÓN DE NITRÓGENO A 20°C

EDN4_7

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Tipo ensayo: E.3

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 15,0

w final (%): 38,8

Sección: 19,24

ρ_d inicial (g/cm³): 1,69

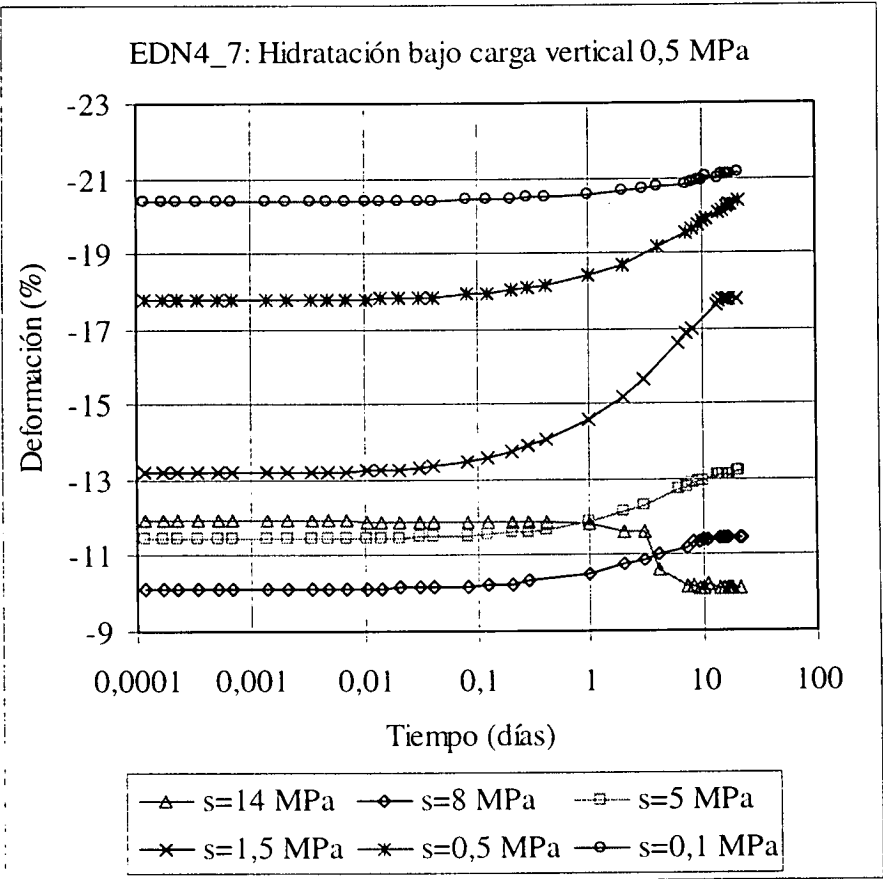
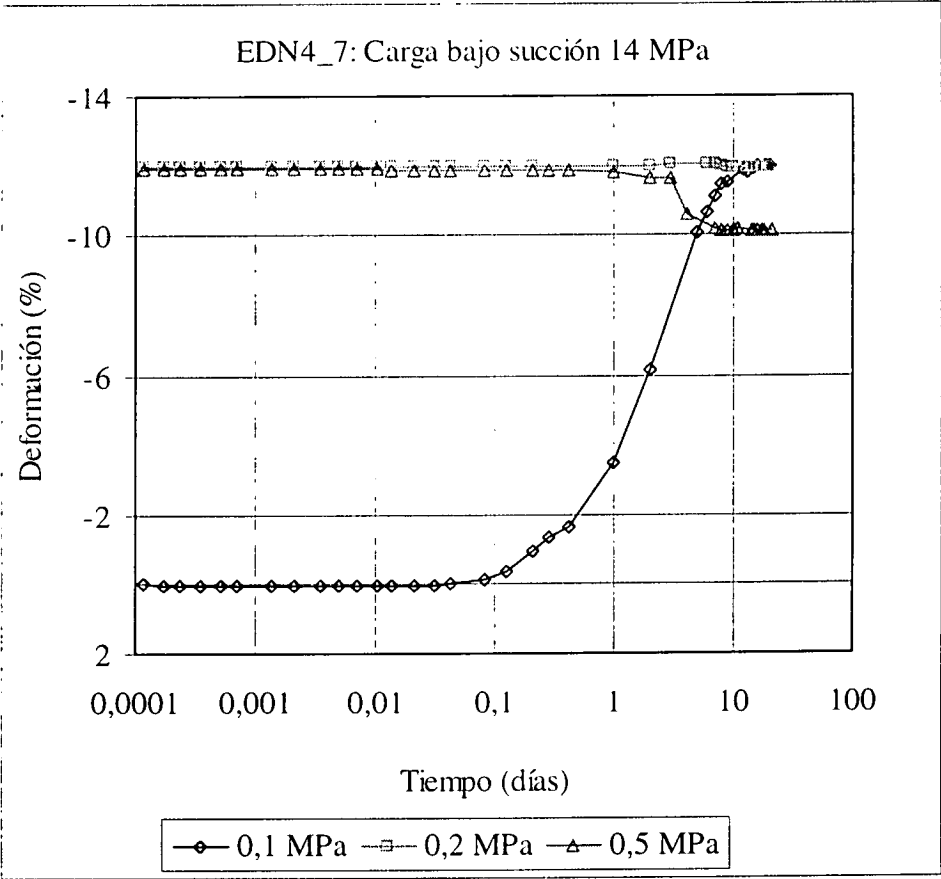
ρ_d final (g/cm³): 1,38

ρ_d f medida (g/cm³): 1,34

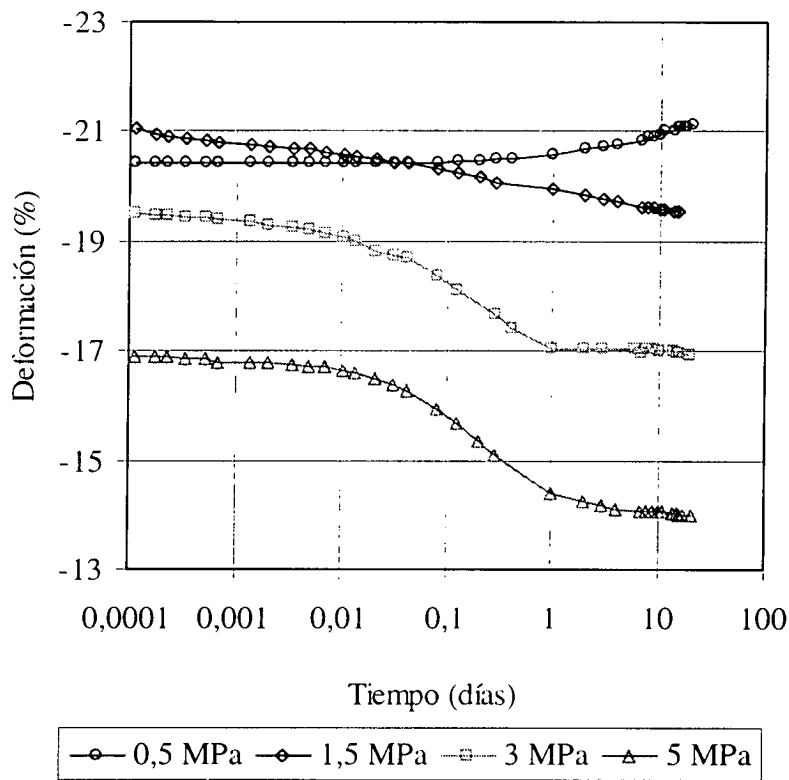
S_r inicial: 68

S_r final: 110

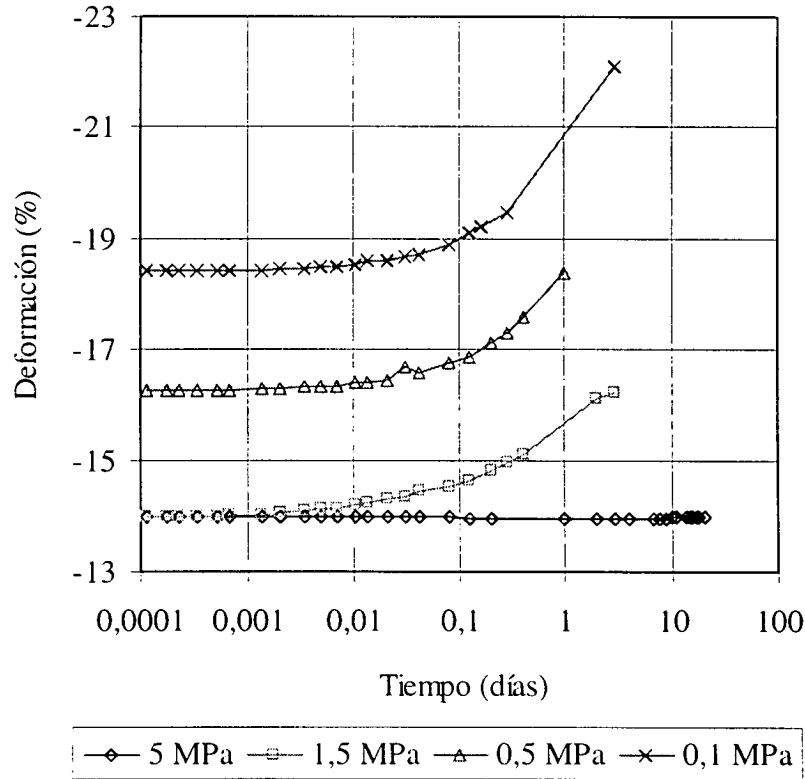
ESCALÓN	ρ_{di} (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ_{df} (g/cm ³)	e final	Días
1	1,690	14,0	0,1	1,51	0,789	20
2	1,51	14,0	0,2	1,51	0,788	20
3	1,51	14,0	0,5	1,54	0,759	21
4	1,54	8,0	0,5	1,52	0,780	22
5	1,52	5,0	0,5	1,49	0,808	21
6	1,49	1,5	0,5	1,43	0,882	20
7	1,43	0,5	0,5	1,40	0,923	21
8	1,40	0,1	0,5	1,40	0,934	21
9	1,40	0,1	1,5	1,41	0,909	15
10	1,41	0,1	3,0	1,45	0,868	20
11	1,45	0,1	5,0	1,48	0,820	21
12	1,48	0,0	5,0	1,48	0,820	21
13	1,48	0,0	1,5	1,45	0,856	3
14	1,45	0,0	0,5	1,43	0,891	1
15	1,43	0,0	0,1	1,38	0,950	3



EDN4_7: Carga bajo succión 0,1 MPa



EDN4_7: Descarga en saturación



ENSAYO HINCHAMIENTO CON SUCCIÓN CONTROLADA CON PRESIÓN DE NITRÓGENO A 20°C

EDN5_6

ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0

Tipo ensayo: E2

Altura inicial (cm): 1,2

w inicial (%): 12,1

w final (%): 35,3

Sección (cm²): 11,40

ρ_d inicial (g/cm³): 1,72

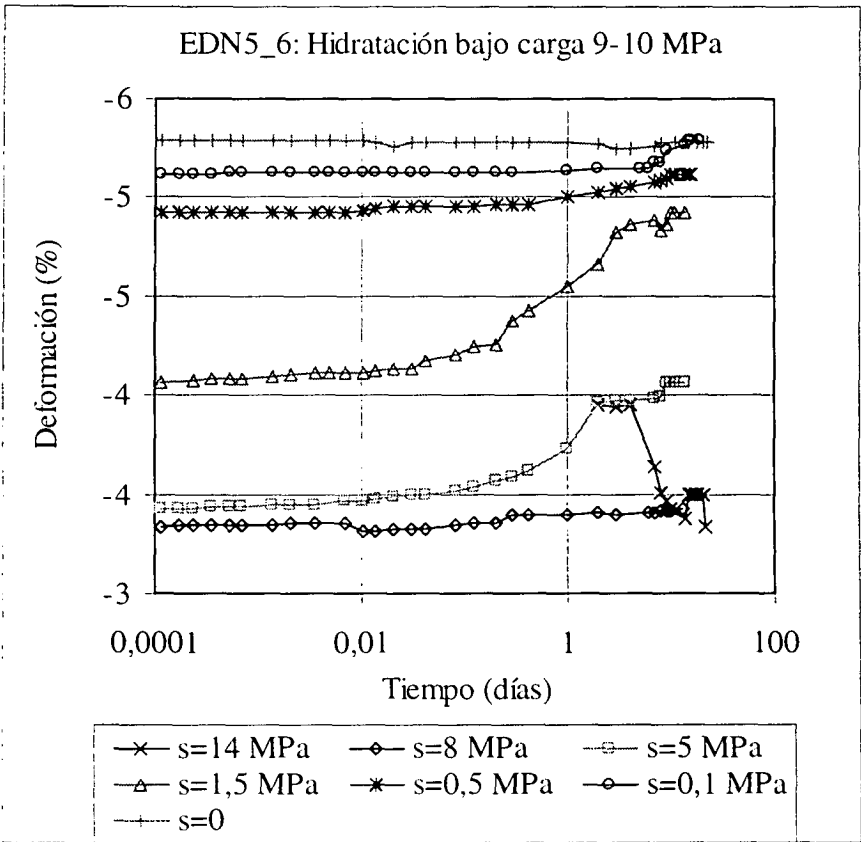
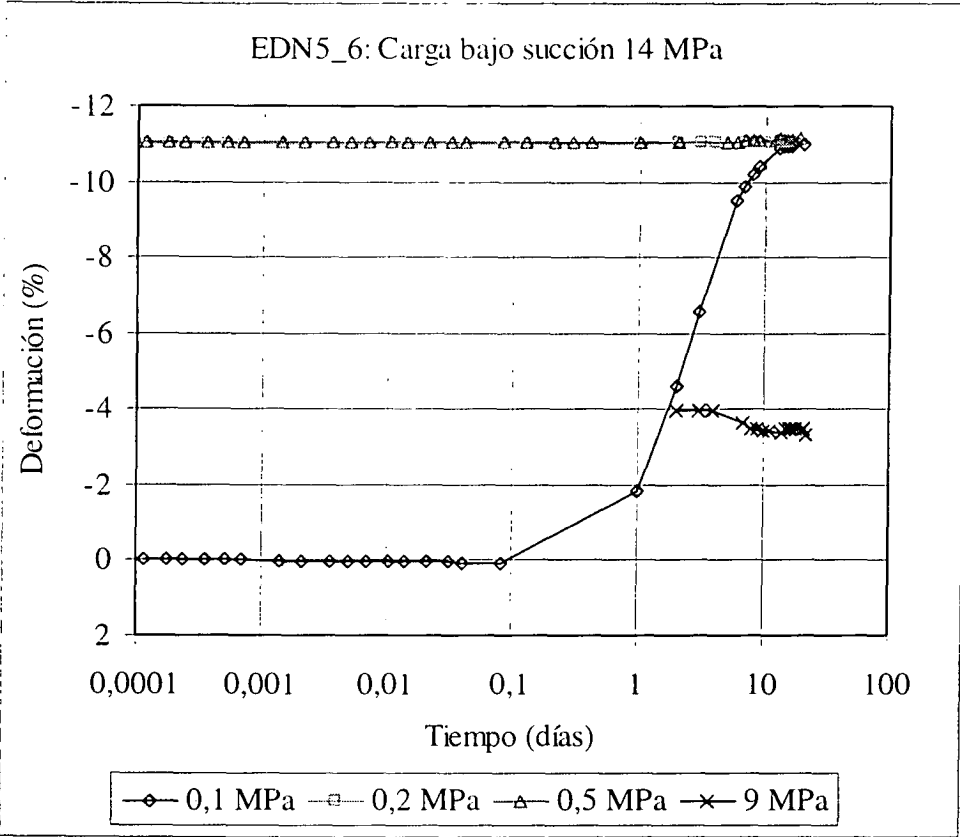
ρ_d final (g/cm³): 1,42

ρ_d f medida (g/cm³): 1,42

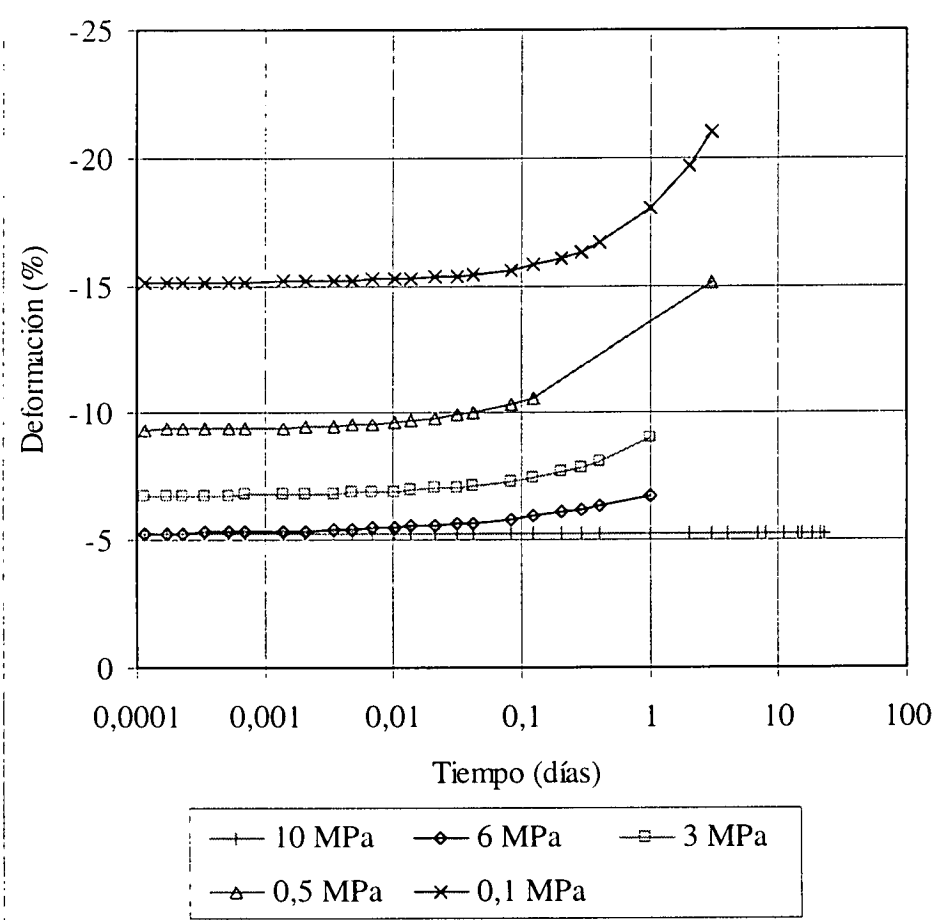
S_r inicial: 57

S_r final: 106

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,719	14,0	0,1	1,55	0,743	20
2	1,55	14,0	0,2	1,55	0,744	16
3	1,55	14,0	0,5	1,55	0,746	19
4	1,55	14,0	8,9	1,66	0,623	22
5	1,66	8,0	9,3	1,66	0,624	13
6	1,66	5,0	9,6	1,65	0,634	14
7	1,65	1,5	9,8	1,64	0,648	14
8	1,64	0,5	9,9	1,64	0,651	16
9	1,64	0,1	9,9	1,63	0,653	19
10	1,63	0,0	9,9	1,63	0,653	23
11	1,63	0,0	5,9	1,61	0,676	1
12	1,61	0,0	3,0	1,58	0,712	1
13	1,58	0,0	0,5	1,49	0,808	3
14	1,49	0,0	0,1	1,42	0,900	3



EDN5_6: Descarga en saturación



ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA POR PRESIÓN DE NITRÓGENO A 40°C

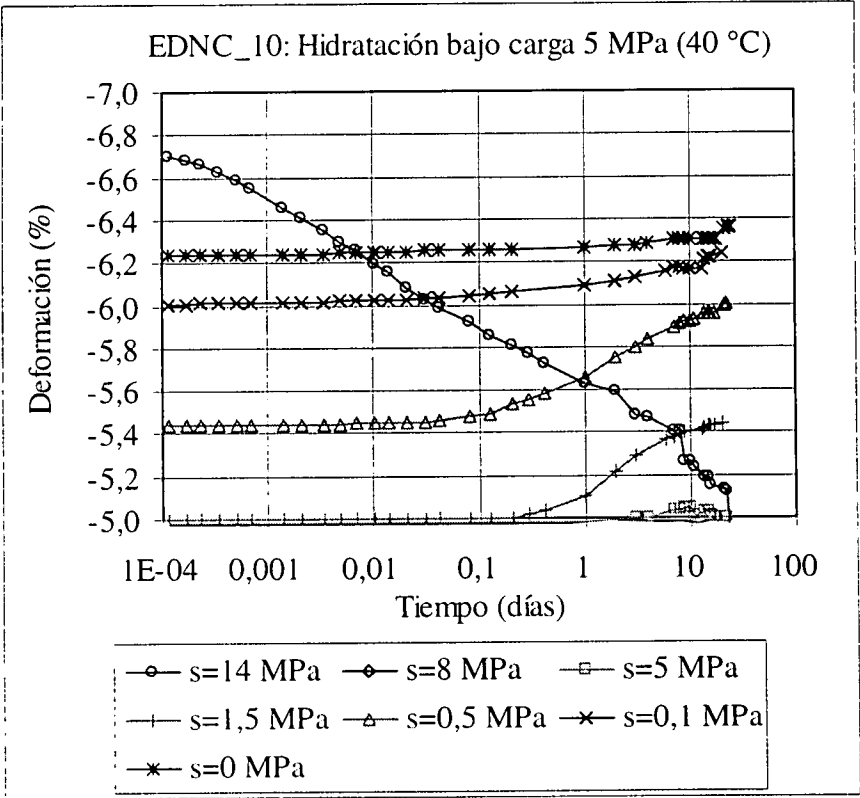
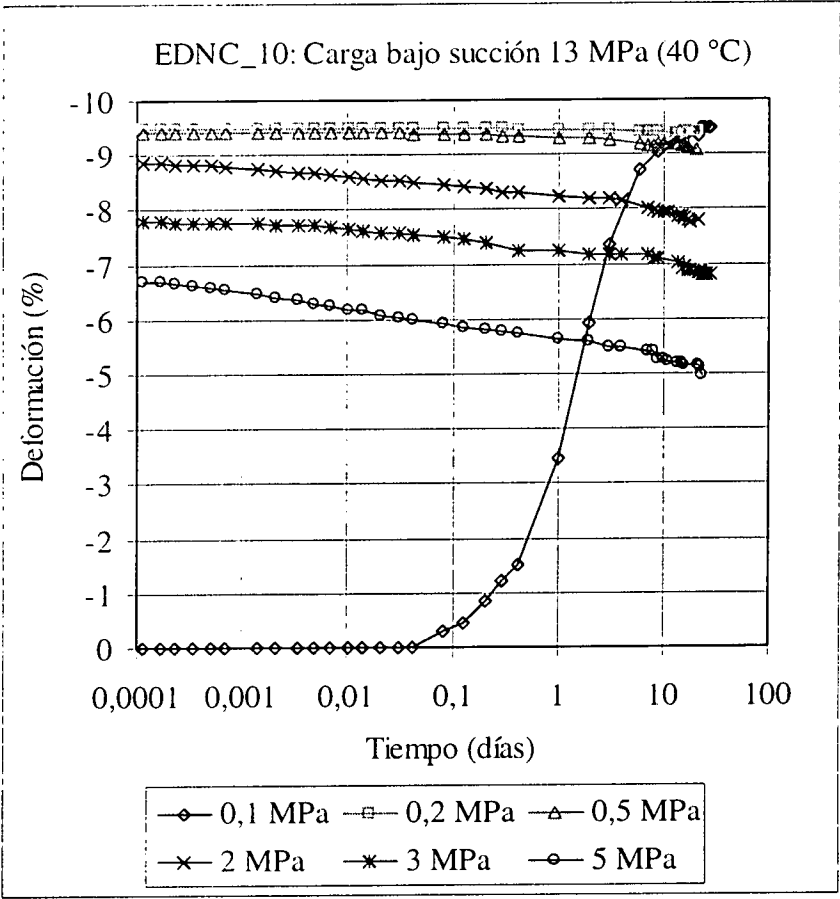
EDNC_10
 ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0
 Tipo ensayo: E2/40

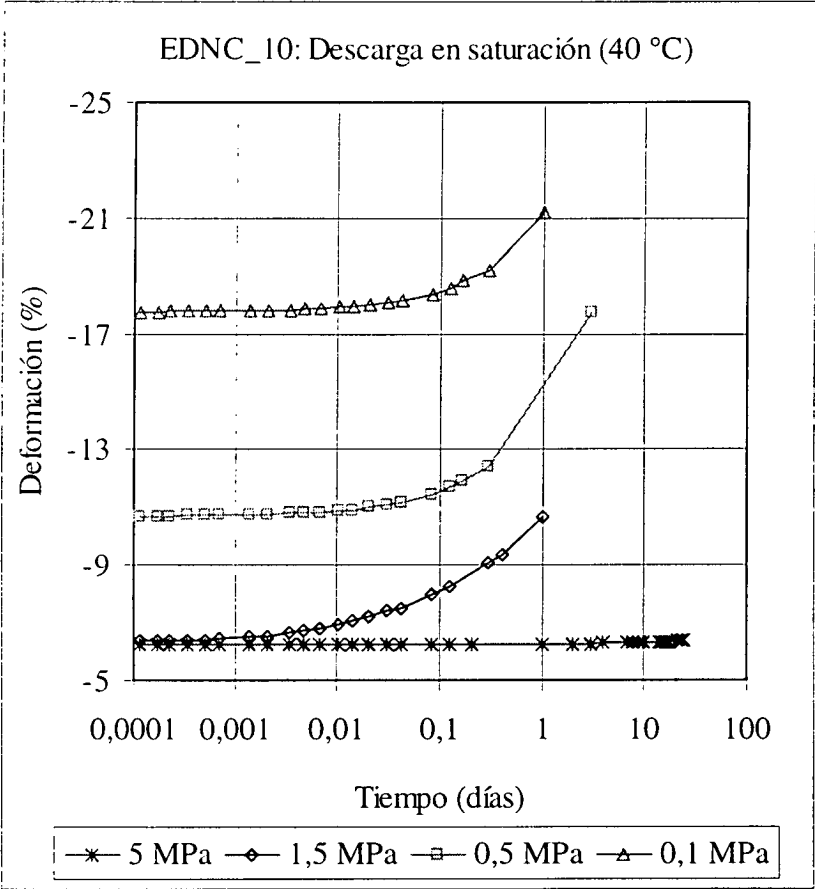
Altura inicial (cm): 1,2
 w inicial (%): 13,9
 w final (%): 35,6

Sección (cm²): 19,63
 ρ_d inicial (g/cm³): 1,70
 ρ_d final (g/cm³): 1,41

ρ_d f medida (g/cm³): 1.38
 S_r inicial: 64
 S_r final: 104

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm ³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm ³)	e final	Días
1	1,70	14,0	0,1	1,56	0,735	28
2	1,56	14,0	0,2	1,56	0,734	21
3	1,56	14,0	0,5	1,56	0,729	20
4	1,56	14,0	2,0	1,58	0,708	21
5	1,58	14,0	3,0	1,60	0,692	28
6	1,60	14,0	5,0	1,62	0,663	23
7	1,62	8,0	5,0	1,62	0,663	19
8	1,62	5,0	5,0	1,62	0,664	22
9	1,62	1,5	5,0	1,62	0,671	20
10	1,62	0,5	5,0	1,61	0,680	22
11	1,61	0,1	5,0	1,60	0,683	20
12	1,60	0,0	5,0	1,60	0,685	24
13	1,60	0,0	1,5	1,54	0,754	1
14	1,54	0,0	0,5	1,45	0,865	3
15	1,45	0,0	0,1	1,41	0,920	1



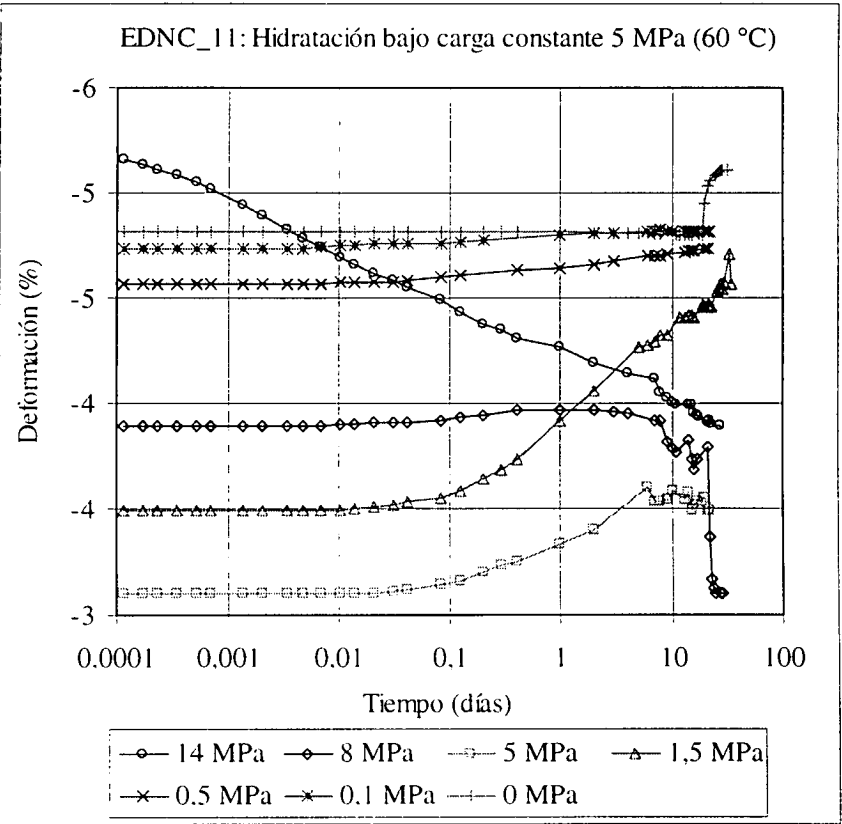
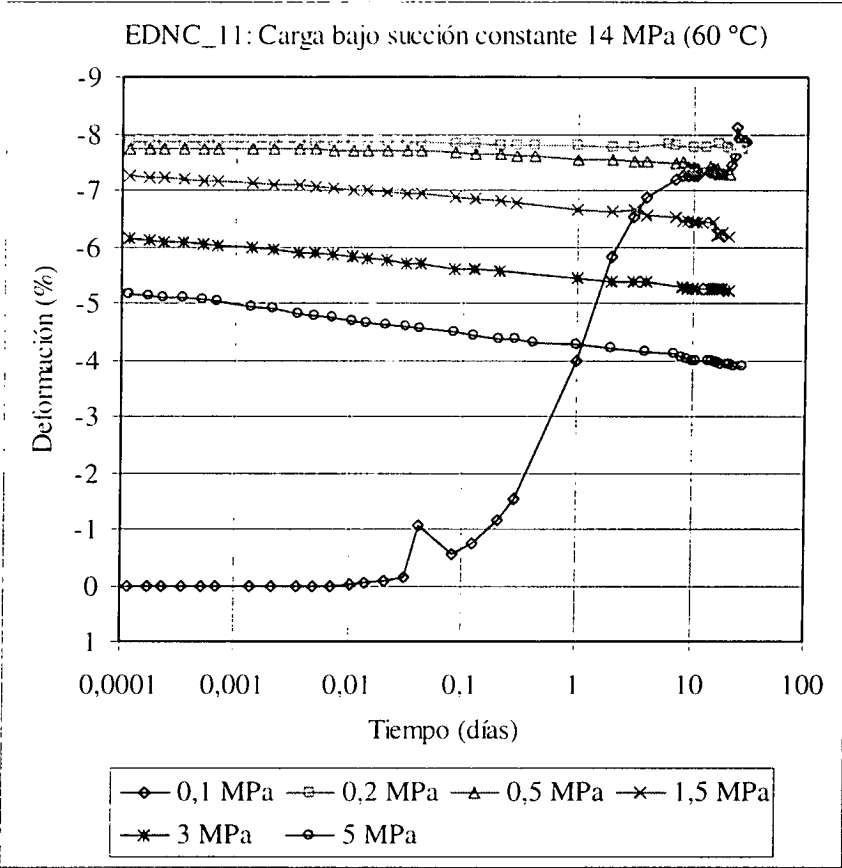


ENSAYO EDMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA POR PRESIÓN DE NITRÓGENO A 60°C

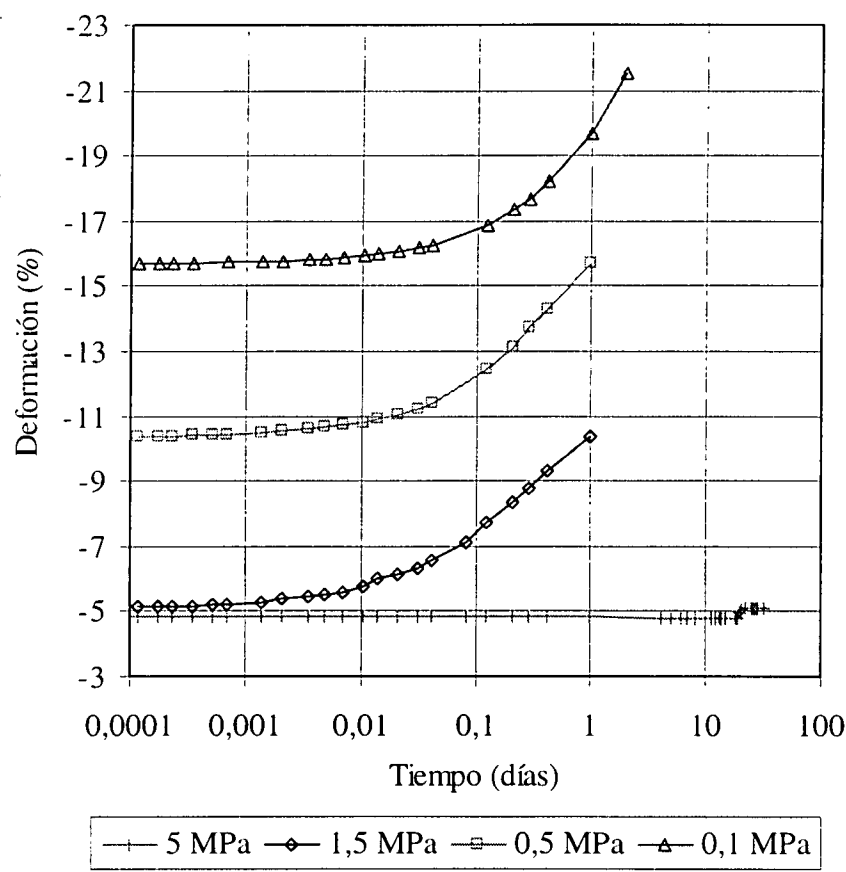
EDNC_11 ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0 E2/60

Altura inicial (cm): 1,20 w inicial (%): 14,7 w final (%): 37,2
 Sección (cm²): 19,63 ρ_d inicial (g/cm³): 1,69 ρ_d final (g/cm³): 1,39
 ρ_d f medida (g/cm³): 1,43 S_r inicial: 66 S_r final: 106

ESCALÓN	ρ _d i (g/cm³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm³)	e final	Días
1	1,69	14	0,1	1,57	0,723	29
2	1,57	14	0,2	1,57	0,721	27
3	1,57	14	0,5	1,57	0,714	21
4	1,57	14	1,5	1,59	0,696	21
5	1,59	14	3,0	1,61	0,682	21
6	1,61	14	4,9	1,63	0,660	28
7	1,63	8	5,0	1,64	0,647	29
8	1,63	5	5,0	1,63	0,654	22
9	1,63	1,5	5,0	1,62	0,671	34
10	1,61	0,5	5,0	1,61	0,674	21
11	1,61	0,1	5,0	1,61	0,675	22
12	1,61	0	5,0	1,61	0,680	32
13	1,60	0	1,5	1,53	0,763	1
14	1,53	0	0,5	1,46	0,848	1
15	1,46	0	0,1	1,39	0,941	2



EDNC_11: Descarga en saturación (60 °C)



ENSAYO EDOMÉTRICO CON SUCCIÓN CONTROLADA POR PRESIÓN DE NITRÓGENO A 80°C

EDNC_12		ARCILLA SERRATA 70-IMA-3-4-0			E2/80	
Altura inicial (cm): 1,20		w inicial (%): 15,3		w final (%): 25,6		
Sección (cm²): 19,63		ρ _d inicial (g/cm³): 1,69		ρ _d final (g/cm³): 1,59		
ρ _d f medida (g/cm³): 1,63		S _r inicial: 69		S _r final: 106		
ESCALÓN	ρ _d i (g/cm³)	Succión (MPa)	Presión (MPa)	ρ _d f (g/cm³)	e final	Días
1	1,69	14,0	0,1	1,55	0,747	29
2	1,55	14,0	0,2	1,55	0,745	26
3	1,55	14,0	0,5	1,57	0,715	56
4	1,57	14,0	1,5	1,59	0,702	63
5	1,59	14,0	3,0	1,60	0,690	52
6	1,60	14,0	5,0	1,62	0,667	81
7	1,62	8,0	5,0	1,61	0,673	15
8	1,61	5,0	5,0	1,61	0,680	21
9	1,61	1,5	5,0	1,59	0,699	48
10	1,59	0,5	5,0	1,59	0,700	22

